



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU SILLANPÄÄ
LIIKENNEMALLIN JA PAIKKATietoANALYYSIN SOVELTUVUUS
JOUKKOLIIKENTEEEN MATKUSTAJAMÄÄRIEN ENNUSTAMISEEN
TAMPEREELLA

Diplomityö

Tarkastaja: TkT Kalle Vaismaa
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
27. elokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TEEMU SILLANPÄÄ: Liikennemallin ja paikkatietoanalyysin soveltuvuus joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen Tampereella

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 71 sivua, 4 liitesivua

Joulukuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Liikenne- ja kuljetusjärjestelmät

Tarkastaja: TkT Kalle Vaismaa

Avainsanat: liikennemalli, paikkatieto, joukkoliikenne, liikenne-ennuste, regressio

Tampereella joukkoliikenteen matkustajamääriä on perinteisesti mallinnettu neliporrasajatteluun perustuvalla seudullisella TALLI-mallilla. Neliporrasmallien verkkokuvaus ja osa-aluejako ovat usein niin karkeita, että ne kuvaavat paikallisia olosuhteita ja pysäkki- tai linjatason matkustajamääriä epätarkasti. Tässä työssä oli tavoitteena löytää vaihtoehtoisia, mahdollisesti paikkatietoon perustuvia, menetelmiä näiden ongelmien ratkaisemiseksi ja arvioida niiden soveltuvuutta joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen Tampereella.

TALLI-mallin lisäksi työssä tutustuttiin Helsingin työssäkäyntialueen Helmet-malliin. Tutkimuksissa vahvistui käsitys siitä, että neliporrasmallit eivät ennusta joukkoliikenteen matkustajamääriä pysäkkitasolla tarkasti. Ratkaisuksi etsittiin vaihtoehtoisia malleja kirjallisuudesta. Selvityksessä löytyneistä malleista parhaaksi vaihtoehdoksi ongelman ratkaisemiseksi tunnistettiin maantieteellisesti painotettu regressio eli GWR. Se toimii hyvin yhteistyössä paikkatieto-ohjelmistojen kanssa, mallien estimointi on nopeaa ja menetelmä vaikutti edistyksellisemmältä kuin muut vaihtoehdot. Aiemmissa tutkimuksissa sillä oli saatu hyviä tuloksia myös pysäkkitasolla.

Työssä estimoitiin GWR-malli Tampereelle syksyn 2017 nousijamäärätilastojen perusteella. Mallin selittävinä muuttujina käytettiin työpaikkojen, asukkaiden ja valintamyy-
mälöiden lukumäärää pysäkin lähellä, matka-aikaa joukkoliikenteellä pysäkiltä lähimpään alakeskukseen ja Tampereen yliopistolle sekä binäärimuuttujia Keskustorin ja Koskipuiston pysäkeille. Mallilla saatiin tuotettua parempi nykytilan nousijamääräkuvaus kuin TALLI-mallilla sekä yksittäisten että kaikkien pysäkkien tarkkuudella.

Tampereen raitiotiehanke on viimeisin hanke, johon Tampereella on laadittu matkustajamääräennusteita. Viralliset ennusteet on laadittu TALLI-mallilla. Lisäksi Eero Kauppinen laati kesän ja syksyn 2018 aikana paikkatietoanalyysin avulla pysäkkikohtaisen nousijamääräennusteen raitiotielle. Myös tässä työssä määritetyllä GWR-mallilla laadittiin ennuste raitiotien avaamisen jälkeisille joukkoliikenteen linjastovaihtoehdoille. Eri malleilla tuotettuja ennusteita verrattiin toisiinsa. Kaikille työssä tarkastelluille malleille löydettiin soveltuva käyttötarkoitus. TALLI-malli soveltuu suurten hankkeiden tarkasteluun seututasolla. Kauppinen menetelmällä saatiin paras pysäkkikohtaisten nousijamäärien kuvaus raitiotielle. GWR-mallilla voidaan puolestaan tutkia erilaisten tekijöiden vaikutusta matkustajamääriin ja sitä voidaan käyttää mallijärjestelmän tuotosmallina. Malli vaatisi vielä jatkokehitystä toimiakseen joukkoliikennesuunnittelun käytännön työkaluna. Kaikilla menetelmillä on puutteensa ja todennäköisesti paras tulos saadaan, kun matkustajamäärien ennustamisessa käytetään useita menetelmiä yhdessä.

ABSTRACT

TEEMU SILLANPÄÄ: Suitability study of transport models and spatial analysis for forecasting the public transport passenger demand in Tampere
 Tampere University of Technology
 Master of Science Thesis, 71 pages, 4 Appendix pages
 December 2018
 Master's Degree Program in Civil Engineering
 Major: Transport and Logistics Engineering
 Examiner: D.Sc. (Tech.) Kalle Vaismaa

Keywords: modelling, public transport, transport forecast, GWR, GIS

Traditionally public transportation passenger demand forecasts are made with a regional four step model TALLI in Tampere. In four step models the network is usually very rough and zones are large. Therefore, the stop or line level passenger volume forecasts are usually inaccurate. To solve this problem this thesis aims to find alternative methods based on GIS analysis to estimate passenger volumes in Tampere. The suitability of the models is evaluated through literature review, interviews and quantitative analysis.

In the study Helsinki region's transportation model Helmet was investigated in addition to TALLI. It was confirmed that forecasting stop level passenger volumes with four step model is inaccurate. Alternative models were searched from literature and the most promising method found geographically weighted regression (GWR). According to the literature review GWR performed well, GWR models are relatively easy to estimate and co-operation with GIS is possible.

In the thesis a GWR model was tested in Tampere. The estimation was based on statistics of passengers boarding at each stop in November 2017. The explanatory variables were number of jobs, shops and population near the stop, travel time from the stop to University of Tampere and to the five biggest residential areas of Tampere and dummy variables for Keskustori and Koskipuisto stops. The predicted number of passengers boarding was more accurate with GWR than with TALLI both in stop level and in city level compared to the statistics' values.

Tampere light rail is the latest public transportation project in Tampere where passenger demand has been forecast. The official forecasts were made with TALLI. During summer and autumn of 2018 Eero Kauppinen used a GIS based method to predict the number of passengers boarding at every light rail stop. Also, the GWR model defined in this thesis was used to forecast stop level public transportation passenger volumes after the opening of the light rail. The forecasts of all methods were compared to each other and the suitability of the methods were evaluated. It was recognized that all the transport models examined in the thesis are suitable for different applications. TALLI is recommended for strategic modelling and multimodal analyses. Kauppinen's model is the most suitable at modelling stop level demand. GWR excels in land use analyses and it can be used as a demand model of a more complicated model system. All the methods had disadvantages as well. The best results are expected to be achieved when different models are used together in analysis.

ALKUSANAT

Alussa oli huhu. Norjassa on tehty ihmeellisiä paikkatietoanalyyskejä, joilla on ennustettu raitiotien matkustajamääriä neliporrasmallia tarkemmin. Huhusta syntyi ajatus. Voisiko tällaista menetelmää hyödyntää myös Tampereella? Siitä se ajatus sitten lähti. Työ on tehty Tampereen raitiotien kehitysohjelman tilauksesta.

Kun Maija Musto ja Eero Kauppinen ensimmäisen kerran tulivat kertomaan, että ovat keksineet minulle diplomityöaiheen, olin kieltämättä melko pihalla, mitä tässä nyt oikein haetaan. Vielä työtä aloittaessakin oli hieman epäselvää, mihin suuntaan työtä lähdetään viemään. Keskustelut Jukka Räsäsen ja myöhemmin Kalle Vaismaan kanssa kuitenkin auttoivat löytämään oikean suunnan.

Oleellinen osa työtä olivat asiantuntijahaastattelut. Oli ilo huomata, kuinka halukkaita asiantuntijat olivat auttamaan ja jakamaan tietotaitoaan. Kiitos kaikille haastatteluihin osallistuneille ja muilla tavoin osaamistaan ja ajatuksiaan jakaneille.

Haluaisin kiittää Ville-Mikael Tuomista, Antti Haukkaa ja Juha-Pekka Häyrystä työn mahdollistamisesta ja ohjaamisesta. Kiitos Maija Mustolle työstä ja tuesta projektinhallintaan liittyvissä asioissa ja innostavasta otteesta työn ohjaukseen. Kiitos myös Riikka Sallille ja Kalle Vaismaalle asiantuntevasta ohjauksesta. Erityiskiitos Jukka Räsäselä, jonka apu ja tuki työn aikana oli korvaamatonta.

Kiitos kollegoilleni Eero Salmiselle avusta paikkatietoanalyysin kanssa, Anne Jokirannalle abstractin oikolukemisesta ja Eero Kauppiselle monipuolisesta avusta työn kaikissa vaiheissa. Kiitos myös Tuomas Paloselle avusta TALLI-mallin kanssa. Lopuksi haluan kiittää Pilviä, joka huolehti jaksamisestani ja kannusti silloinkin, kun oma usko työn valmistumisesta ajoissa horjui.

Tampereella, 19.11.2018

Teemu Sillanpää

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 1.1 | Työn taustat | 1 |
| 1.2 | Tavoitteet ja rajaus | 1 |
| 1.3 | Tutkimuksen suoritus | 2 |
| 1.4 | Raportin rakenne | 3 |
| 2. | JOUKKOLIIKENNE JA LIIKENNEMALLIT | 5 |
| 2.1 | Joukkoliikenteen palvelutaso | 5 |
| 2.2 | Liikennemallit ja -ennusteet | 6 |
| 2.2.1 | Neliporrasmalli..... | 7 |
| 2.2.2 | Regressiomallit..... | 10 |
| 2.2.3 | Gravitaatiomallit | 11 |
| 2.2.4 | Logittimallit | 12 |
| 2.3 | Liikenne-ennusteiden tarkkuus ja sopivuus | 13 |
| 2.4 | Suomessa käytettävät sijoitteluohjelmistot | 14 |
| 2.4.1 | Emme | 14 |
| 2.4.2 | Visum | 16 |
| 2.4.3 | Joukkoliikenteen sijoittelualgoritmit..... | 17 |
| 2.5 | Tampereen raitiotie | 17 |
| 2.6 | Linjasto2021 | 18 |
| 3. | JOUKKOLIIKENTEEN MALLINTAMINEN | 20 |
| 3.1 | TALLI 2015 | 20 |
| 3.2 | Helmet 3.0 | 23 |
| 3.2.1 | Malliprosessin kuvaus..... | 24 |
| 3.2.2 | Joukkoliikenteen mallintaminen Helmetillä | 26 |
| 3.2.3 | Helmetin tuottamat ennusteet..... | 28 |
| 3.3 | Matkustajamääräennusteet raitiotiehankkeissa | 29 |
| 3.4 | Vaihtoehtoisia malleja..... | 30 |
| 3.4.1 | Suorat kysyntämallit | 31 |
| 3.4.2 | Usean muuttujan lineaariset regressiomallit | 32 |
| 3.4.3 | Maantieteellisesti painotettu regressio | 33 |
| 3.5 | GTWR | 35 |
| 3.6 | Joukkoliikenteen kysyntään vaikuttavien tekijöiden määrittäminen | 35 |
| 4. | MATKUSTAJAMÄÄRÄENNUSTEET TAMPEREELLA | 38 |
| 4.1 | Mallin nykytilan vertailu toteutuneisiin matkustajamääriin..... | 38 |
| 4.2 | Raitiotien ennusteet | 40 |
| 4.3 | Ennusteiden vertailu | 42 |
| 5. | MATKUSTAJAMÄÄRIEN ENNUSTAMINEN PYSÄKKITASOLLA | 47 |
| 5.1 | Menetelmä | 47 |
| 5.2 | Lähtötiedot | 47 |
| 5.3 | Muuttujien valinta | 50 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.4 | Maantieteellisesti painotettu regressiomalli | 53 |
| 5.5 | Ennuste GWR-mallilla | 57 |
| 6. | POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 60 |
| 6.1 | Menetelmien soveltuvuus matkustajamäärien ennustamiseen | 60 |
| 6.2 | Joukkoliikenteen mallintaminen Tampereella | 63 |
| 6.3 | Tutkimuksen arviointi | 64 |
| 6.4 | Jatkotutkimus | 65 |
| | LÄHTEET | 67 |

LIITE A: REGRESSIOMALLIEN MUUTTUJAVAIHTOEHDOT

LIITE B: RAITIOTIEN NOUSIJAT PYSÄKEITTÄIN LINJASTO2021- VAIHTOEHDOISSA

LIITE C: ESIMERKKI PYSÄKKIKOHTAISISTA TULOKSISTA GWR-MALLILLA

KÄSITTEITÄ JA LYHENTEITÄ

| | |
|------------------------|---|
| Aggrekointivirhe | Yksilötasolla syntyvä virhe, kun tietoja käsitellään alueellisina tai väestöryhmittäisinä keskiarvoina. |
| AHT | Aamuhuipputunti, tarkoittaa tunnin mittaista ajanjaksoa yleensä aikavälillä 6:00–8:59, jolloin tarkasteltavan kulkutavan alkavien matkojen määrä on suurimmillaan. |
| AIC | Akaiken vertailuluku (<i>Akaike's information criterion</i>) on mallin hyvyttä kuvaava tunnusluku, jota käytetään mallien väliseen vertailuun. |
| Attraktio | Suuntautumismallissa tietyn osa-alueen houkuttelevuus määräpaikana |
| Emme | Sijoitteluohjelmisto |
| Etäisyysfunktio | Gravitaatiomalliin kuuluva funktio, joka kuvaa kahden osa-alueen välistä etäisyyttä. |
| Estimointi | Malliparametrien määrittäminen |
| Faktori | Mallin selittävä muuttuja. |
| Generointi | Liikennemallin osa-alueet tuottavat eli generoivat matkoja. |
| Gloaali regressiomalli | Regressiomalli, jossa selittävien muuttujien parametrien arvot oletetaan vakioiksi tarkastelualueella. |
| Gravitaatiomalli | Suuntautumismalli, joka laskee alueiden välisten matkojen lukumäärän alueen tuottamien ja houkuttelemien matkojen, etäisyyden ja määränpään houkuttelevuuden perusteella. |
| GTWR | Maantieteellisesti ja ajallisesti painotettu regressiomalli (<i>Geographically and Temporally Weighted Regression</i>), jossa selittävien muuttujien parametrit vaihtelevat paikan ja ajan suhteen. |
| GWR | Maantieteellisesti painotettu regressiomalli (<i>Geographically Weighted Regression</i>), jossa selitettävien muuttujien parametrit vaihtelevat paikan suhteen. |
| Helmet 3.0 | Helsingin työssäkäyntialueen liikennemalli |
| Hyötyfunktio | Logittimallissa vaihtoehtojen houkuttelevuutta kuvaava funktio, joka koostuu mitattavissa olevasta osasta ja satunnaistermistä. |
| IHT | Iltahuipputunti, tarkoittaa tunnin mittaista ajanjaksoa yleensä aikavälillä 15:00–17:59, jolloin tarkasteltavan kulkutavan alkavien matkojen määrä on suurimmillaan. |

| | |
|---------------------------|--|
| Iterointi | Mallin soveltaminen peräkkäin siten, että uuden kierroksen lähtökohdaksi otetaan edellisen kierroksen tulos. |
| Kauppisen malli | Eero Kauppisen Tampereen kaupungin tilauksesta konsulttityönä laatima raitiotien matkustajamääräennuste |
| Kerrannaismalli | Suora kysyntämalli, jolla voidaan mallintaa matkatuotos, suuntautuminen ja kulkutavan valinta yhdellä mallilla. |
| Konvergoida | Iteroidessa malli suppenee eli konvergoituu, jos lopputulos alkaa vakiintua kohti jotakin raja-arvoa. |
| Kysyntämallit | Mallit, joilla tuotetaan kysyntämatriisit. Näitä ovat matkatuotos, suuntautuminen ja kulkutavanvalinta. Myös pelkän matkatuotoksen tuottavia malleja voidaan kutsua kysyntämalleiksi. |
| Liikenne-ennuste | Johonkin määrättyyn ajankohtaan sijoittuva arvio sen hetkisistä matkamääristä. |
| Liikennemalli | Malli, jolla kuvataan matkustusvalintoja |
| Linjasto2021 | Tampereen seudun joukkoliikenteen projekti, jonka tarkoituksena on suunnitella bussilinjasto raitiotien kanssa toimivaksi kokonaisuudeksi, kun raitiotien liikennöinti alkaa vuonna 2021. |
| Logsum | Strukturoidun logittimallin tekijä, jolla mallin eri osat kytketään toisiinsa. Vastaa logittimallin nimittäjän luonnollista logaritmia. |
| Lokaali regressiomalli | Regressiomalli, jonka selittävien muuttujien parametrien arvot riippuvat maantieteellisestä sijainnista. |
| Matkamatriisi | Käytetään myös nimitystä OD-matriisi (<i>Origin-Destination matrix</i>). Taulukkomuotoinen esitys, jolla voidaan kuvata kahden osa-alueen välistä matkojen lukumäärää alueelta toiselle. |
| Matkavastus | Vastuksella tarkoitetaan matkustamisesta koituvaa haittaa matkustajan näkökulmasta, esimerkiksi matka-aikaa tai matkan kustannusta. |
| Multinominen Logittimalli | Todennäköisyysteoreettinen yksilömalli, joka kuvaa todennäköisyyttä, jolla tietty yksilö valitsee tietyn vaihtoehdon, kuten kulkutavan. Multinominen logittimalli olettaa, että hyötyfunktion satunnaisosa noudattaa Gumbel- tai Weibull-jakaumaa. |
| Neliporrasmalli | Osamalleista koostuva liikennemallikokonaisuus, joka mallintaa liikennekäyttäytymistä neljässä vaiheessa: tuotos, suuntautuminen, kulkutavan valinta ja sijoittelu. |
| Nousuvastus | Kuvaa matkustajalle jokaisesta joukkoliikennematkan aikana tehdystä noususta aiheutuvaa vastusta. |

| | |
|---------------------------|--|
| OLS | Pienin neliösumma (<i>Ordinary least square</i>). Lineaaristen regressiomallien estimointimenetelmä. Nimitystä käytetään tässä työssä myös globaaleista regressiomalleista, jotka on estimoitu tällä menetelmällä. |
| Palvelutaso | Liikennepalvelun tavoiteltua, toteutunutta ja koettua laatua kuvaava tekijä |
| Palvelutasotekijä | Palvelutasoon vaikuttava tekijä. Esimerkiksi joukkoliikenteen palvelutasoon vaikuttaa mm. matka-aika, vuoroväli ja täsmällisyys. |
| Parametri | Liikennemallissa oleva estimoitava kerroin, eksponentti tai muu vakiona pysyvä tekijä. Esimerkiksi mallissa $y = a + bx^c$ vastetta y selittää muuttuja x ja kolme parametria a , b ja c . |
| Päivätunnin liikenne | eli PT tarkoittaa keskimääräistä arkipäivän tuntiliikennettä yleensä aikavälillä 9:00–14:59. |
| R^2 | eli selitysaste kuvaa, kuinka hyvin malli selittää vasteen arvon vaihtelua. |
| Raidekerroin | Empiirinen, tapauskohtaisesti määritettävä kerroin, joka kuvaa raide liikenteen linja-autoa suurempaan houkuttelevuuteen liittyviä psykologisia ja sosiaalisia tekijöitä. |
| Regressiomalli | Malli, jolla kuvataan jonkin tekijän tilastollista riippuvuutta toisista tekijöistä regressioanalyysin avulla. |
| Ryhmämalli | eli aggregaattimalli on malli, joka kuvaa alueellisia tai väestöryhmittäisiä keskiarvoja. |
| Sijoittelu | Neliporrasmallin viimeinen vaihe, jossa tuotettu kysyntä jaetaan liikenneverkolle. |
| Sijoittelualgoritmi | Algoritmi, jonka perusteella sijoitteluohjelmisto jakaa liikenteen eri reittien välillä liikenneverkolla. |
| Strukturoitu logittimalli | Logittimalli, jossa on useampia ulottuvuuksia, jotka vaikuttavat toisiinsa muodostaen puurakenteen. Englanniksi <i>Nested logit model</i> . |
| Suuntautumismalli | Neliporrasmallin toinen vaihe, jossa alueiden välisille matkoille arvioidaan alku- ja loppupiste alueiden tuottamien ja houkuttelemien matkojen perusteella. |
| TALLI 2015 | Tampereen seudun liikennemalli |
| Tarjontamalli | Malli, joka kuvaa esimerkiksi liikenneverkkoa tai joukkoliikennelinjastoa. Sijoittelun yhteydessä verkkoa kuormitetaan kysyntämatriisilla, jolloin saadaan tuloksena esimerkiksi vastusmatriiseja. |

| | |
|----------------|--|
| Vaihtovastus | Joukkoliikenteessä vaihtamisesta syntyvä lisävastus, joka johtuu esimerkiksi vaihtamiseen liittyvästä valmistautumisesta ja riskistä. |
| Vaste | Mallin selitettävä muuttuja |
| Vastusmatriisi | Kuvaa alueiden välisten matkojen vastusta, kuten matka-aikoja, kustannuksia tai etäisyyksiä. |
| Visum | Sijoitteluohjelmisto |
| YKR | Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämä Yhdyskuntarakenteen seuranta-aineisto, joka on kuvattu 250 m x 250 m ruudukkoon. Sisältää tietoja esimerkiksi asukkaiden, työpaikkojen ja kauppojen lukumääristä. |
| Yksilömalli | Malli, jolla mallinnetaan yksilöiden tekemiä valintoja. |

1. JOHDANTO

1.1 Työn taustat

Tampereella rakennetaan raitiotietä, jonka on määrä valmistua vuonna 2021. Tähän asti Tampereen joukkoliikenteessä on liikennöity ainoastaan linja-autoilla. Raitiotien valmistuessa on tarve uusista myös bussilinjasto, jotta bussit ja raitiotie luovat yhdessä toimivan ja kustannustehokkaan kokonaisuuden. Tätä varten on syytä selvittää joukkoliikenteen matkustajamääriä tuleville vuosille.

Maankäytön tiivistyminen ja asukasluvun kasvu aiheuttavat merkittävää matkustajamäärien lisääntymistä. Hyvän joukkoliikennetarjonnan varten rakennetaan uusia asuntoja, eikä näiden uusien asukkaiden kulkutapajakauma välttämättä vastaa nykyisten asukkaiden liikkumistottumuksia.

Tavallisesti Tampereella matkustajamäärien arvioimiseen on käytetty TALLI-liikennemallia, joka on perinteinen seudullinen neliporrasmalli. Tällaiset mallit eivät kuitenkaan huomioi kovin hyvin paikallisia olosuhteita. Niitä päivitetään harvoin, joten nopeita muutoksia liikkumistottumuksissa ei voida huomioida. Matkustajamäärien ennustaminen yksittäisillä linjoilla ei ole tarkkaa, koska mallit on tarkoitettu seudulliseen tarkasteluun. On siis tarpeen selvittää vaihtoehtoisia tapoja joukkoliikenteen matkustajamäärien arvioimiseen.

Muun muassa Norjan Bergenissä on käytetty menetelmää, jossa paikkatiedon perusteella pysäkkien ympäristön väestömääristä, havaituista matkatuotoksista ja etäisyyden sekä kävelyolosuhteiden vaikutuksesta arvioitiin pysäkkien nousijamääriä. Näin saatiin perinteisiä kysyntämalleja paremmat arviot matkustajamääristä. Kyseisessä mallissa ei kuitenkaan oteta kantaa matkojen suuntautumiseen eikä muihin kulkutapoihin, joten se ei sel-laisenaan riitä kaikkiin suunnittelun tarpeisiin. [44]

1.2 Tavoitteet ja rajaus

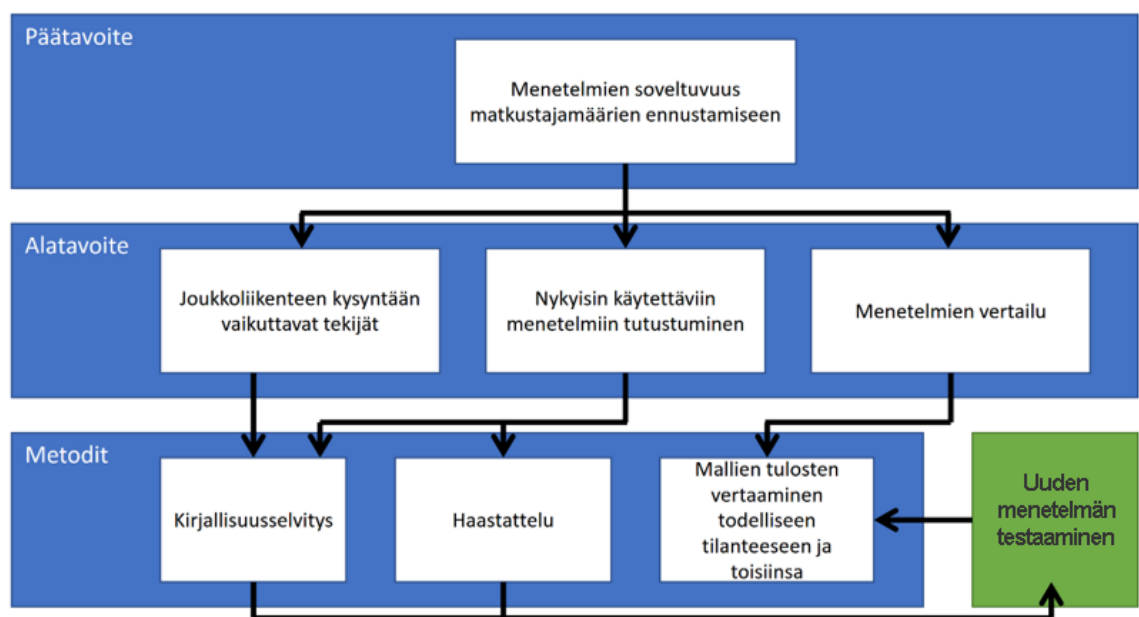
Tässä työssä tutustutaan joukkoliikenteen kysyntään vaikuttaviin tekijöihin, niiden mallintamiseen paikkatiedon avulla ja nykyisin käytössä oleviin liikennemalleihin. Työn pää-tavoitteena on vertailla erilaisia vaihtoehtoja matkustajamäärien arvioimiseksi Tampe-reella ja antaa jatkosuosituksia Tampereen kaupungille. Lisäksi tavoitteena on testata paikkatietoanalyysiin perustuvaa menetelmää ja sen soveltuvuutta Tampereen joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen pysäkki- tai linjakohtaisesti.

Tutkimuksen päättökysymykseksi muotoutui: Miten eri menetelmät soveltuvat joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen Tampereella?

Tämän kysymyksen vastaus saadaan vastaamalla seuraaviin alakysymyksiin:

- Mitkä tekijät vaikuttavat joukkoliikenteen kysyntään?
- Mitä tietoja tarvitaan joukkoliikenteen kysynnän ennustamiseen?
- Mitä keinoja matkustajamäärien ennustamiseksi on olemassa?
- Miten eri menetelmien tulokset eroavat toisistaan ja kuinka hyvin ne kuvaavat todellisuutta?

Työn tavoitehierakia ja käytettävät metodit on esitetty alla (Kuva 1).



Kuva 1 Työssä arvioidaan mallien soveltuvuutta kirjallisuuden, haastatteluiden ja ennusteiden tarkkuuden perusteella.

Tutkimuksessa keskitytään joukkoliikenteen matkustajamääräennusteisiin. Siinä arvioidaan erityisesti liikennemallien ja paikkatietoanalyysin soveltuvuutta matkustajamäärien arvioimiseen yksittäisen linjan tai pysäkin tasolla. Työssä ei pyritä kehittämään koko Tampereen kattavaa mallijärjestelmää, vaan testataan menetelmää, jolla voidaan arvioida yksittäisten pysäkkien matkustajamääriä.

1.3 Tutkimuksen suoritus

Merkittävän osan työstä muodosti kirjallisuusselvitys. Kirjallisuushakuja tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston kirjaston Andor-tietokannasta ja Google Scholarista mm. hakusanoilla ”public transport”, transit, modelling, GIS, demand, forecast ja ”station level”. Hauilla etsittiin erityisesti erilaisia paikkatietoanalyysiin perustuvia menetelmiä, joita voidaan hyödyntää joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamisessa. Lisäksi työssä

tutustuttiin Tampereen ja Helsingin seutujen liikennemalleihin mallidokumentaation avulla.

Kirjallisuusselvitystä täydennettiin asiantuntijahaastatteluilla. Haastatteluiden tavoitteena oli syventää ymmärrystä Tampereen seudun TALLI-mallista sekä Helsingin seudun Helmet-mallista ja selvittää vaihtoehtoisia menetelmiä joukkoliikenteen mallintamiseen. Haastattelut tehtiin kesän 2018 aikana ja ne toteutettiin teemahaastatteluina. TALLI-malliin liittyen haastateltiin mallin kehittäjää Hanna Kalenojaa. Helmet-mallin osalta haastateltiin Timo Elolähdettä, Mervi Vatasta ja Jens Westiä Helsingin seudun liikenteeltä. Lisäksi haastateltiin Norconsultilta Thomas Potteria, joka on ollut mukana laatimassa Bergenin raitiotien ennusteita ja vaihtoehtoista paikkatietoon perustuvaa menetelmää. Haastatteluiden lisäksi useilta henkilöiltä saatiin tietoja sähköpostitse.

TALLI-mallin toiminnan testaamiseksi sen ennusteita verrattiin toteutuneisiin matkustajamääriin ja muilla menetelmillä tuotettuihin ennusteisiin. Viimeisin merkittävä hanke, johon on laadittu joukkoliikenteen matkustajamääräennusteet Tampereella, on raitiotiehanke. Työssä verrattiin TALLI:n vuoden 2016 ennustetta toteutuneisiin matkustajamääriin sekä vuoden 2025 ennustetta Eero Kauppinen kesän ja syksyn 2018 aikana paikkatietoanalyysin avulla laatimiin ennusteisiin, jotka tehtiin Tampereen kaupungin tilaamaa konsulttityötä varten.

Työn tulosten pohjalta päädyttiin testaamaan uuden tyyppistä mallia, jonka soveltuvuutta Tampereen joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen testattiin raitiotien valmistumisen jälkeisiä linjastovaihtoehtoja vertaamalla. Malli estimoitiin vuoden 2017 tilanteeseen ja ennuste laadittiin vuodelle 2021.

Työtä ohjasi ohjausryhmä, johon kuuluivat Antti Haukka Tampereen raitiotien kehitysohjelmasta, Juha-Pekka Häyrynen Tampereen kaupungilta, Kalle Vaismaa Tampereen teknillisestä yliopistosta sekä Maija Musto, Riikka Salli ja Jukka Räsänen Ramboll Finland Oy:stä. Ohjausryhmä ohjasi työtä projektikokouksissa, joita pidettiin työn teon aikana neljä.

1.4 Raportin rakenne

Raportti koostuu kuudesta luvusta. Johdannon jälkeen luvussa 2 käsitellään työn taustoja. Luku keskittyy liikenteen mallintamiseen yleisesti ja joukkoliikenteen näkökulmasta. Lisäksi luvussa käsitellään joukkoliikenteen palvelutasoa ja esitellään lyhyesti Tampereen raitiotietä sekä Linjasto2021-projektia.

Luvussa 3 esitellään kirjallisuusselvityksen ja haastatteluiden tuloksia. Luvussa esitellään Tampereen seudun liikennemalli TALLI, Helsingin työssäkäyntialueen liikennemalli Helmet ja vaihtoehtoisia menetelmiä joukkoliikenteen mallintamiselle. Lisäksi luvussa käsitellään joukkoliikenteen mallintamista eurooppalaisissa raitiotiekaupungeissa.

Luvussa 4 tarkastellaan TALLI-mallin soveltuvuutta joukkoliikenteen mallintamiseen. Luvussa vertaillaan TALLI:n vuoden 2016 ennustetta toteutuneisiin matkustajamääriin ja Tampereen raitiotien matkustajamääräennusteita vaihtoehtoisilla menetelmillä laadittuun ennusteeseen.

Luku 5 käsittelee työn soveltavaa osuutta. Tutkimuksen perusteella päädyttiin testaamaan alueellisia regressiomalleja joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamisessa pysäkitasolla. Luvussa kuvataan mallin toimintaperiaate, lähtötiedot ja tulokset.

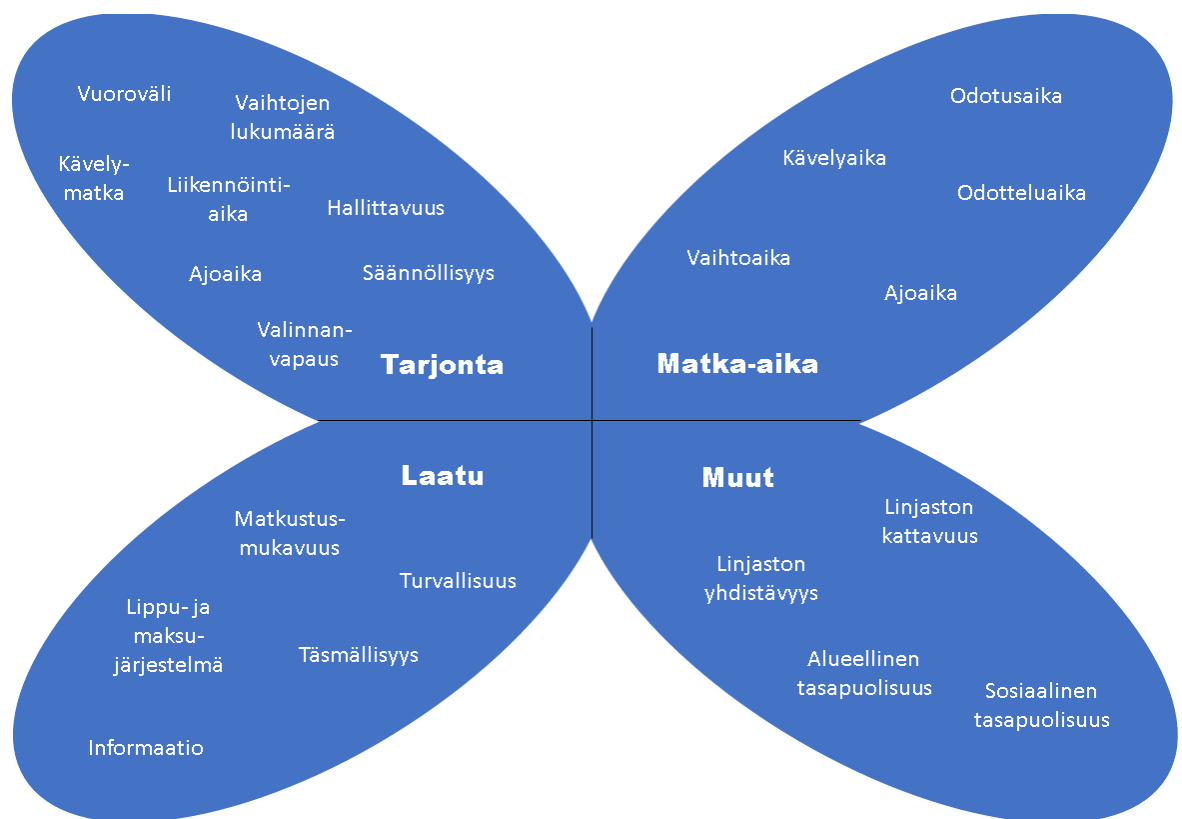
Luvussa 6 työstä tehdään yhteenveto ja johtopäätökset. Luvussa tehdään päätelmiä eri menetelmien soveltuvuudesta ja pohditaan niiden käyttömahdollisuuksia ja kehittämistä tulevaisuudessa. Lisäksi luvussa arvioidaan tutkimuksen onnistumista ja pohditaan mahdollisia jatkotutkimuksia.

2. JOUKKOLIIKENNE JA LIIKENNEMALLIT

2.1 Joukkoliikenteen palvelutaso

Palvelutaso on moniulotteinen käsite, jolle ei ole tarkkaa määritelmää. Määritelmään vaikuttaa se, mistä näkökulmasta palvelutasoa tarkastellaan. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että joukkoliikenteen palvelutaso on joukkoliikenteen tavoiteltua, toteutunutta ja koettua tai oletettua laatua kuvaava tekijä. [32] Joukkoliikennelain [19] 4 § velvoitti palvelusopimusasetuksen mukaisia toimivaltaisia joukkoliikenneviranomaisia määrittämään toimivalta-alueelleen palvelutason. Laki liikenteen palveluista [31] astui kuitenkin voimaan 1.7.2018, eikä se enää sisällä vastaavaa velvoitetta.

Palvelutasoa voidaan tarkastella palvelutasotekijöiden avulla. Pesonen et al. [42] jakavat palvelutasotekijät neljään luokkaan: tarjonta, matka-aika, matkan laatu ja muut tekijät. Alla on kuvattu eri luokkiin sisältyviä tekijöitä (Kuva 2).



Kuva 2 Palvelutasotekijät voidaan jakaa neljään luokkaan. Muokattu lähteestä [42]

Tarjonnan osatekijät ovat pääsääntöisesti numeerisesti mitattavissa ja liikenteen tarjoaja voi vaikuttaa niihin. Matka-aika sisältyy myös tarjonnan osatekijöihin (kävelymatka, ajoaika, vaihtojen lukumäärä), mutta sitä voidaan tarkastella myös erikseen. Laatutekijöitä

on puolestaan vaikea arvioida määrällisesti. Ne voidaan jakaa mitattavissa oleviin tekijöihin ja koettuun palvelun laatuun ja ryhmitellä liikennejärjestelmän, palvelun ja ympäristön laatuun. Muut tekijät ovat puolestaan kokonaispalvelutasoon vaikuttavia tekijöitä. [42]

Palvelutason määrittäminen ja kehittäminen on monivaiheinen prosessi. Aluksi selvitetään joukkoliikenteen nykyinen tarjonta ja palvelutaso nykytilan analyysissä. Seuraavaksi tunnistetaan tavoitteet, joita joukkoliikenteellä halutaan tavoitella. Ne voivat olla valtakunnallisia tai kunnallisia liikenne-, ilmasto- tai energiapoliittisia tavoitteita. Lisäksi huomioidaan kansalaisten ja elinkeinoelämän tarpeet sekä rahoitusmahdollisuudet. Näiden tietojen perusteella asetetaan tavoitteet palvelutasolle. Nykytilan analyysin ja tavoitteiden perusteella voidaan määrittää millaista joukkoliikenteen palvelutasoa kullakin alueella tarvitaan ja pystytään järjestämään, eli määritetään palvelutaso. Samalla laaditaan arvio palvelutason kustannusvaikutuksista. Lopuksi suoritetaan täytäntöönpano, jossa joukkoliikenne pyritään järjestämään palvelutason mukaisesti ja järjestetään seuranta. [33]

2.2 Liikennemallit ja -ennusteet

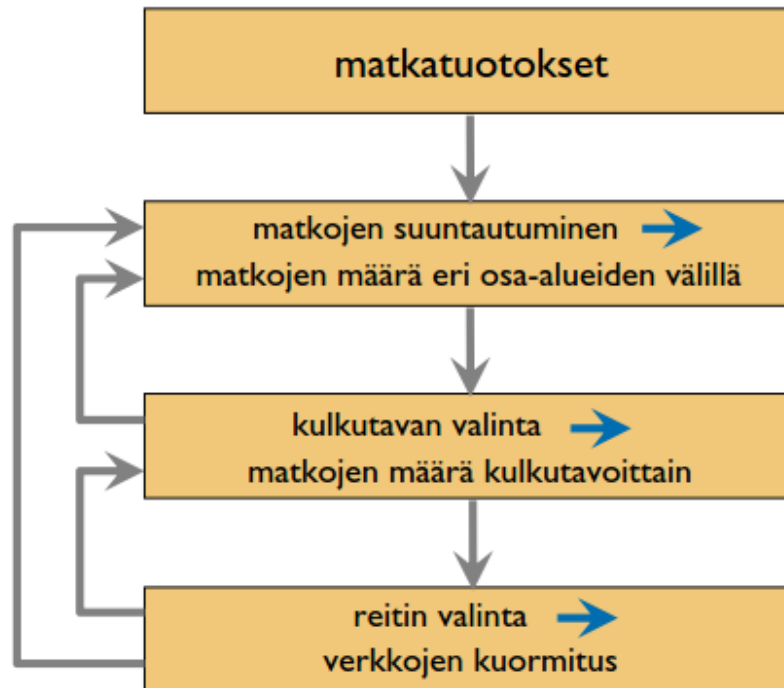
Liikenne-ennusteita laaditaan, jotta voidaan arvioida tulevaisuuden liikennejärjestelmän toimintaa. Liikenne-ennusteita voidaan laatia valtakunnallisesti tai paikallisesti, lyhyelle tai pitkälle aikavälille. Ennusteita voidaan tehdä liikennemalleilla. [26] Mallit ovat yksinkertaistettuja kuvauksia todellisista ilmiöistä. Mallin toiminta on vahvasti sidoksissa näkökulmaan ja ongelmaan, jotka se on luotu ratkaisemaan. [60] Liikennemallit ovat malleja, joilla kuvataan matkustusvalintoja. Nykytilanteen liikkumistottumukset pyritään siirtämään tulevaisuuden liikennetarjontaan. Oletuksena on siis, että valinnat tapahtuvat tulevaisuudessa samoilla perusteilla kuin nykyään. [25]

Mallit voidaan jakaa ryhmämalleihin (*aggregate model*) ja yksilömalleihin (*disaggregate model*) sen mukaan, mallinnetaanko alueellisia keskiarvoja vai yksittäisiä valintoja. Ryhmämalleja ovat esimerkiksi regressiomallit ja yksilömalleja logittimallit. Yksilömallien käyttäytymis- ja talousteoreettinen tausta on parempi, joten niitä on käytetty 1980-luvulta lähtien henkilöliikennemalleissa enemmän kuin ryhmämalleja. [26]

Liikenteen mallintamisesta ja ennustamisesta puhutaan usein synonyymeinä, mutta näissä on kuitenkin pieni periaatteellinen ero. Mallinnettaessa pyritään luomaan työkalu, jota voidaan säädellä erilaisilla lähtötiedoilla ja joka reagoi loogisesti näihin muutoksiin. Onnistunut malli antaa luotettavia ja keskenään vertailukelpoisia tuloksia erilaisille hankkeille ja tuottaa näin lähtötietoa liikennesuunnitteluun. Liikenne-ennusteet taas pyrkivät luomaan mahdollisimman hyvin tulevaisuutta vastaavan kuvan liikennejärjestelmästä. Yleensä ennusteella pyritään arvioimaan liikennemääriä ja kustannuksia. Malleja voidaan käyttää ennusteiden tekemisessä, mutta niiden lisäksi tarvitaan muita analyyseja. Malleilla tuotettuja tuloksia tulkitsevien pitää tuntea hyvin mallin toiminta ja rajoitukset, ettei niiden pohjalta tehdä vääriä johtopäätöksiä. [60]

2.2.1 Neliporrasmalli

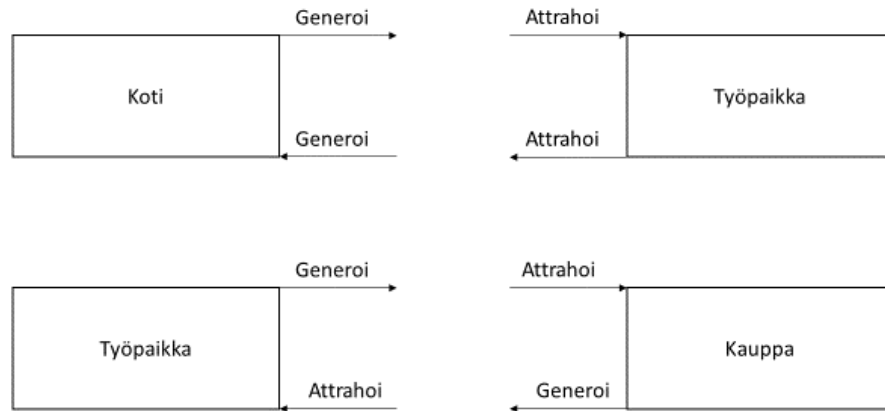
Liikennemallit voivat olla yksinkertaisia tai erittäin monimutkaisia. Strategiset mallit ovat usein monista osamalleista koostuvia monimutkaisia järjestelmiä. [25] Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on esitetty neliporrasmallin vaiheet.



Kuva 3 Neliporrasmallissa on neljä vaihetta: tuotokset, suuntautuminen, kulkutavan valinta ja sijoittelu [25].

Liikenne-ennusteet ja -mallit voivat perustua yhteen tai useampaan näistä neljästä vaiheesta. Seudulliset mallit ovat neliporrasmalleja, joissa jokaiselle vaiheelle on omat mallinsa, joita käytetään mallijärjestelmän osamalleina. [25] Neliporrasmallin luominen aloitetaan jakamalla tarkasteltava alue pienempiin osa-alueisiin ja kuvataan liikenneverkko. Näille alueille hankitaan ja koodataan sopivalla tavalla tiedot maankäytöstä. Näitä tietoja voivat olla esimerkiksi nykyiset ja tulevat asukasmäärät, työpaikkojen lukumäärä ja palveluiden, kuten kauppojen määrä. [60]

Matkatuotosvaiheessa arvioidaan montako matkaa mallissa määritetyt alueet tuottavat (generoivat) ja houkuttelevat (attrahoivat). Alueen i generoimia matkoja merkitään O_i ja alueen i attrahoimia matkoja D_i . Matkat voidaan jakaa kotiperäisiin ja ei-kotiperäisiin matkoihin. Kotiperäisiä matkoja ovat kaikki, joiden lähtö- tai määräpaikka on koti ja ne generoituvat aina kotona ja attrahoivat matkan toisessa päässä (Kuva 4). [60]



Kuva 4 Kotiperäiset matkat generoituvat aina kotona. Ei-kotiperäiset matkat generoituvat lähtöpaikassa ja attrahoituvat määränpäässä. Muokattu lähteestä [60]

Suuntautumisvaiheessa matkoille arvioidaan alku- ja loppupiste. Tulokset kerätään niin sanottuun matkamatriisiin, josta käytetään yleisemmin nimitystä OD-matriisi (*origin-destination matrix*). Alla olevassa taulukossa (Taulukko 1) on esitetty yleiskuvaus OD-matriisista. T_{ij} on matkojen määrä alueelta i alueelle j . [60]

Taulukko 1 OD-matriisissa kuvataan matkojen määrät eri alueilta toisille [60].

| | Määräpaikka | | | | | |
|-----------------|-------------|----------|----------|-----|----------|---------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | ... | j | $\sum_j T_{ij}$ |
| Lähtöpaikka | 1 | 2 | 3 | ... | j | $\sum_j T_{ij}$ |
| 1 | T_{11} | T_{12} | T_{13} | ... | T_{1j} | O_1 |
| 2 | T_{21} | T_{22} | T_{23} | ... | T_{2j} | O_2 |
| 3 | T_{31} | T_{32} | T_{33} | ... | T_{3j} | O_3 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | ... | \vdots | \vdots |
| i | T_{i1} | T_{i2} | T_{i3} | ... | T_{ij} | O_i |
| $\sum_i T_{ij}$ | D_1 | D_2 | D_3 | ... | D_j | $\sum_{ij} T_{ij} = \mathbf{T}$ |

Matkamääriä voidaan myös erottaa eri ilmiöiden tai tekijöiden, kuten sukupuolen tai kulkutavan mukaan ja ne voidaan esittää myös prosenttiosuuksina. Tällöin jokaiselle tarkastettavalle tekijälle luodaan oma matriisi. Esimerkiksi T_{ij}^{kn} voi tarkoittaa ikäryhmän n matkamäärää alueelta i alueelle j kulkutavalla k . Eri matriisien summan täytyy vastata matkojen kokonaismäärää:

$$T_{ij}^n = \sum_k T_{ij}^{kn} \text{ ja edelleen } T_{ij} = \sum_n T_{ij}^n.$$

Matriisin rivien summan täytyy vastata alueen generoimien matkojen määrää ja sarakkeiden summan alueen attrahoimien matkojen määrää. [60]

$$\sum_j T_{ij} = O_i \tag{1}$$

$$\sum_i T_{ij} = D_i \tag{2}$$

Toinen tapa esittää matkojen suuntautumista on generaatio-attraکتio -matriisi (GA-matriisi) [60]. GA-suunnatut kotiperäiset matkat generoituvat kotona riippumatta matkan todellisesta suunnasta (Kuva 4). Ne voidaan ennustaa GA-suunnattuina ja myöhemmin kääntää OD-suunnatuiksi kääntökertoimilla. [9] Esimerkiksi koulumatkat tuottavat OD-suunnattuna yhden matkan aamulla kotoa kouluun ja iltapäivällä koulusta kotiin. GA-suunnattuna matkoja generoituu päivän aikana kotoa kouluun kaksi kappaletta, eikä yhtään toiseen suuntaan. [60]

Voidaan sanoa, että kulkutavan valinta on liikennesuunnittelun kannalta mallin tärkein ominaisuus [25, 60]. Ilman kulkutavan valintamallia tehdyillä ennusteilla ei voida ottaa huomioon liikkumistottumusten muutoksia, jotka ovat merkittävässä osassa esimerkiksi joukkoliikenteen matkustajamäärien arvioimisessa. Liikennehankkeet harvoin vaikuttavat pelkästään reitin valintaan vaan esimerkiksi uusi nopeampi pyöräily-yhteys voi siirtää ihmisiä käyttämään auton tai joukkoliikenteen sijasta polkupyörää. [25] Kulkutavan valintaan vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: yksilön ominaisuudet, matkan ominaisuudet ja ympäristön ominaisuudet. Yksilötasolla kulkutapapäätökseen vaikuttavat esimerkiksi käytössä olevat vaihtoehdot, yksilön tulotaso ja perhe. Erilaisille matkoille valitaan usein eri kulkutapa. Työmatka toistuu usein ja samaa reittiä, mikä tukee joukkoliikenteen käyttöä. Matkan ajankohdalla on merkitystä erityisesti joukkoliikenteen kannalta, koska aikataulut vaihtelevat. Myös sillä on merkitystä tehdäänkö matka yksin vai ryhmässä. Liikenneympäristö on merkittävä osa kulkutavan valintaa. Kulkutavat, joiden käyttäminen on nopeaa, helppoa ja edullista ovat suosituimpia kuin muut. [60]

Mallin neljännessä vaiheessa aiemmissa vaiheissa määritelly liikennekysyntä sijoitellaan liikenneverkolle. Sijoitteluun käytetään erikoisohjelmistoja, jotka sisältävät valmiiksi reitinvalinta-algoritmin ja muita mallin osia, mutta myös mallintaja pääsee vaikuttamaan mallin käyttäytymiseen [25]. Sijoittelussa OD-matriisissa esitetyille matkoille valitaan

reitti ja tuloksena saadaan katu- ja tieverkkoa tai joukkoliikennelinjastoa esittävälle linkeille liikennevirrat. Sijoittelun oletuksena on, että ihminen valitsee rationaalisesti edullisimman reitin. Yleensä matkan kustannusta tarkastellaan sekä ajan että rahallisten kustannusten kannalta. Malliin voidaan sisällyttää erilaisia käyttäjäryhmiä, jotka tekevät matkavalintoja erilaisilla perusteilla. Myös kapasiteetin täyttymisestä johtuvat viivästykset voidaan huomioida sijoittelussa. [60]

2.2.2 Regressiomallit

Regressioanalyysi on ehkä eniten sovellettu tilastotieteen menetelmä. Regressiomalli on malli, jolla kuvataan jonkin tekijän tilastollista riippuvuutta toisista tekijöistä regressioanalyysin avulla. Regressiomallit voivat olla lineaarisia tai epälineaarisia. [40]

Regressiomalleissa suure y riippuu suureista x_1, x_2, \dots, x_k . y on siis selitettävä muuttuja eli vaste ja x_k ovat selittäviä muuttujia eli faktoreita. y :n arvoja voidaan approksimoida funktiolla f , joka voi olla esimerkiksi usean muuttujan polynomi, jonka kertoimet ovat parametreja:

$$y = f(x_1, \dots, x_k) + \varepsilon, \quad (3)$$

jossa ε on virhetermi. Jos funktio f on ensimmäisen asteen polynomi, voidaan malli kirjoittaa muotoon

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (4)$$

missä β on estimoitava parametri. [46]

Tällaista mallia kutsutaan lineaariseksi regressiomalliksi, jos funktio $f(x_1, \dots, x_k)$ on lineaarinen parametrien β suhteen. Yleinen lineaarinen malli voidaan esittää matriisimuodossa

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (5)$$

$$\text{missä } \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ ja } \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}. \quad [40]$$

Jotta mallia voidaan käyttää ennustamiseen, täytyy olla käytettävissä riittävä määrä faktorien arvoyhdistelmiä. Kun dataa on tarpeeksi, voidaan malli estimoida. Yleisin regressiomallien estimointitapa on pienimmän neliösumman (*OLS, ordinary least square*) menetelmä. Siinä valitaan parametrit $\boldsymbol{\beta}$ siten, että

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}\|^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) \quad (6)$$

minimoituu. Ottamalla gradientin β suhteen ja merkitsemällä sen nollavektoriksi saadaan lineaarinen yhtälöryhmä josta voidaan ratkaista β :

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (7)$$

jota merkitään $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}$. Oletuksena on, että $n \geq k + 1$. Kun \mathbf{b} on ratkaistu, voidaan en-

nustaa muita faktorien tasoja vastaavat vasteet kaavalla 8:

$$\hat{y} = (\mathbf{x}')^T \mathbf{b}, \quad (8)$$

missä \hat{y} on ennustettava vaste, \mathbf{x}' ennustetilanteen faktorien arvot ja \mathbf{b} estimaattorivektori. [46] Mallien estimointi voidaan tehdä tilasto-ohjelmistoilla [46].

Regressiomalli on yksi vaihtoehto osamalliksi neliporrasmallin ensimmäisessä vaiheessa. Alueiden tuottamia ja houkuttelemia matkoja voidaan arvioida sosioekonomisten tekijöiden, kuten auton omistuksen avulla. Mitä pienempi tarkasteltava alue on, sitä pienempi on alueen sisäinen vaihtelu. [60]

Kaikki tekijät eivät kuitenkaan vaikuta matkamääriin lineaarisesti. Tätä voidaan kuitenkin kiertää muuttamalla muuttuja lineaariseksi esimerkiksi logaritmillä tai eksponentilla. Parhaan muutostavan löytäminen on kuitenkin työlästä. Joissain tapauksissa parempi vaihtoehto on käyttää binäärimuuttujia. [60] Toinen ongelma on, että alueilta lähtevien ja saapuvien matkojen summat eivät automaattisesti välttämättä täsmää. Ongelma voidaan korjata muutuskertoimella. Yleensä matkojen lähtöpaikka pystytään ennustamaan luotettavammin kuin määräpaikka, joten jokaisen alueen saapuvien matkojen määrä D_i kerrotaan kertoimella f :

$$f = \frac{\sum_i O_i}{\sum_j D_j}, \quad (9)$$

missä $\sum_i O_i$ on alueilta lähtevien matkojen summa ja $\sum_j D_j$ alueille saapuvien matkojen summa. [60]

2.2.3 Gravitaatiomallit

Gravitaatio- eli vetovoimamallit ovat yleisimpiä suuntautumismalleja. Ne muistuttavat Newtonin vetovoimamallia. Vetovoimamalleissa eri alueiden välisten matkojen määrän ajatellaan riippuvan lähtevien matkojen määrästä, alueiden välisestä etäisyydestä ja määränpään toimintojen määrästä ja luonteesta. Kun liikennettä generoivat toiminnot, kuten asukkaiden tai työpaikkojen määrä, kasvavat, liikenne alueiden välillä kasvaa. Vastaa- vasti mitä suurempi etäisyys alueiden välillä on, sitä pienempi liikennevirta syntyy. [26]

Generointi-attrahointiperiaatteeseen perustuvaa vetovoimamallia kutsutaan etenkin Suomessa Voorhees-malliksi. Mallin mukaan alueiden i ja j välinen liikennevirta on verrannollinen alueen i generoimien ja alueen j houkuttelemien matkojen kokonaismäärään. Malli voidaan kirjoittaa muotoon:

$$T_{ij} = \frac{G_i A_j f(d_{ij})}{\sum_j A_j f(d_{ij})}, \quad (10)$$

missä T_{ij} on alueiden i ja j välinen liikennevirta, G_i on alueen i generoimien matkojen määrä, A_j on alueen j attrahoimien matkojen määrä ja $f(d_{ij})$ on alueiden i ja j välinen etäisyysfunktio. Nimittäjässä oleva tekijä $A_j f(d_{ij})$ kuvaa alueiden sijaintia toisiinsa nähden ja sitä kutsutaan tavoitettavuudeksi. [26]

Etäisyysfunktion muodoksi voidaan johtaa entropian maksimoinnilla eksponenttifunktio:

$$f(d_{ij}) = e^{-\beta d_{ij}}, \quad (11)$$

jossa β on aineistosta määritettävä parametri. Eksponentin arvo riippuu mm. matkan tarkoituksesta, kulkutavasta ja aluetyypistä. Käytännössä funktion muoto kuitenkin sovitaan mitatun aineiston mukaan, eikä malli ole sidottu eksponenttifunktioon. Parametrit voidaan määrittää esimerkiksi regressioanalyysillä. [26]

2.2.4 Logittimallit

Logittimalli on todennäköisyysteoreettinen yksilömalli. Se kuvaa todennäköisyyksiä, joilla tietty yksilö valitsee tietyn vaihtoehdon. Liikenne-ennusteissa niitä käytetään erityisesti kulkutavan valintamalleina. Todennäköisyyden oletetaan riippuvan vaihtoehdon suhteellisesta houkuttelevuudesta suhteessa henkilön sosioekonomisiin ominaisuuksiin. Oletuksena on, että henkilö käyttäytyy johdonmukaisesti ja kykenee laittamaan tarjolla olevat vaihtoehdot järjestykseen. [26]

Vaihtoehtojen houkuttelevuutta kuvataan hyötyfunktioilla U , jonka ajatellaan koostuvat mitattavissa olevasta deterministisestä osasta V ja satunnaistermistä ε . Hyötyfunktio on siten muotoa

$$U = V + \varepsilon. \quad (12)$$

Mitattavissa olevan osan oletetaan yleensä olevan muuttujien lineaarikombinaatio, joka voidaan kirjoittaa muotoon

$$V = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k, \quad (13)$$

missä $\beta_1 \dots \beta_k$ ovat estimoitavia parametreja ja $x_1 \dots x_k$ muuttujia. Jos oletetaan, että hyötyfunktion satunnaisosa noudattaa Gumbel- tai Weibull-jakaumaa, saadaan tulokseksi multinominen logittimalli, joka on muotoa

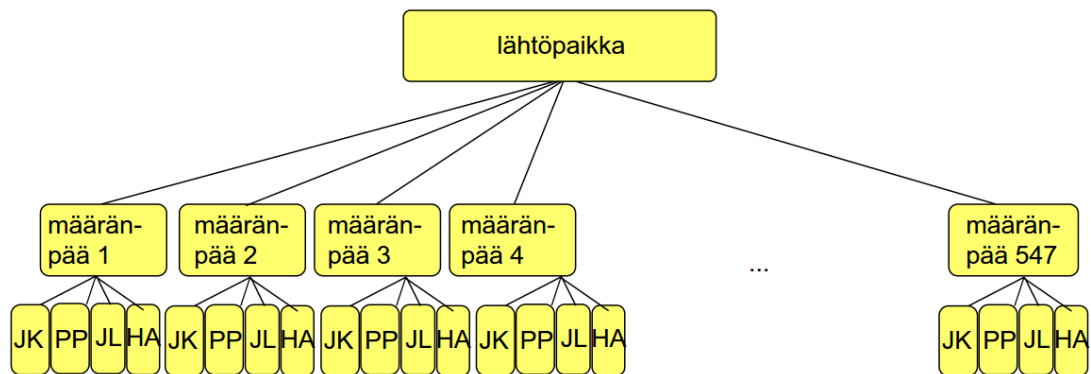
$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j}}, \quad (14)$$

missä P_i on vaihtoehdon i todennäköisyys ja J vaihtoehtojen lukumäärä. [26]

Logittimallin tärkeimpiä ominaisuuksia on riippumattomuus epäolennaisista vaihtoehtoista. Kahden vaihtoehdon valintatodennäköisyys ei ole riippuvainen muiden vaihtoehtojen todennäköisyydestä. Logittimalli voidaan siis estimoida pienelle osajoukolle. Malli voidaan esimerkiksi estimoida autoille ja joukkoliikenteelle ilman, että tarvitsee ottaa huomioon muiden kulkutapojen osuuksia. [26]

Jos mallissa on useampi kuin kaksi ulottuvuutta, puhutaan strukturaalisesta logittimallista (*nested logit model*). Tästä esimerkkinä voidaan käyttää mallia, jossa matkojen suuntautuminen ja kulkutapa valitaan samalla mallilla. Mallista muodostuu niin sanottu puuraakenne, jota on kuvattu alla (Kuva 5). Mallin osat kytketään toisiinsa logsum-tekijällä, joka on kulkutavan valintamallin nimittäjän luonnollinen logaritmi. [26]

$$\logsum = \ln \sum_m e^{V_m} \quad (15)$$



Kuva 5 Strukturaalisessa logittimallissa valintoja tehdään ketjussa, esimerkiksi suuntautuminen ja kulkutavan valinta voidaan linkittää toisiinsa. [24]

2.3 Liikenne-ennusteiden tarkkuus ja sopivuus

Liikenne-ennusteiden virheet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: liikennemalleihin liittyviin virheisiin ja selittävien muuttujien ennustamiseen liittyviin virheisiin. Liikennemalleihin liittyvät virheet voivat olla mallin toimintaan liittyviä, kuten aggregointivirhe, joka tarkoittaa alueellisten ja väestöryhmien keskiarvojen käsittelystä syntyvää virhettä yksilötasolla. Liikennemalleihin liittyvät virheet voivat olla myös virheitä otannassa tai

mallimäärittelyissä. Virheitä voi syntyä, vaikka mallia käytettäisiinkin täysin oikein. Tällöin puhutaan selittävien muuttujien ennustamiseen liittyvistä virheistä. Ne voivat johtua esimerkiksi maankäytön ennusteissa tapahtuneista virheistä. Usein virheet ennusteissa johtuvatkin enemmän virheellisistä lähtöoletuksista kuin itse mallista. [26]

Mallin hyvyys riippuu siitä, kuinka hyvin vaihtoehdot pystytään kuvaamaan mallissa, eli onko löydetty ja pystytty kuvaamaan valinnan kannalta oleelliset muuttujat. Näiden tulee olla riittävän yksinkertaisia, helposti ymmärrettäviä ja ennustettavia. Malli on kuitenkin aina yksinkertaistettu kuvaus todellisuudesta, eikä kaikkea voida ottaa mallissa huomioon. Lisäksi funktiomuodot voivat olla virheellisiä tai liian yksinkertaisia. Mallivirhettä voidaan pienentää lisäämällä mallin monimutkaisuutta ja selittävien muuttujien määrää, mutta tämä lisää puolestaan riskiä virheisiin lähtötiedoissa. [26]

2.4 Suomessa käytettävät sijoitteluohjelmistot

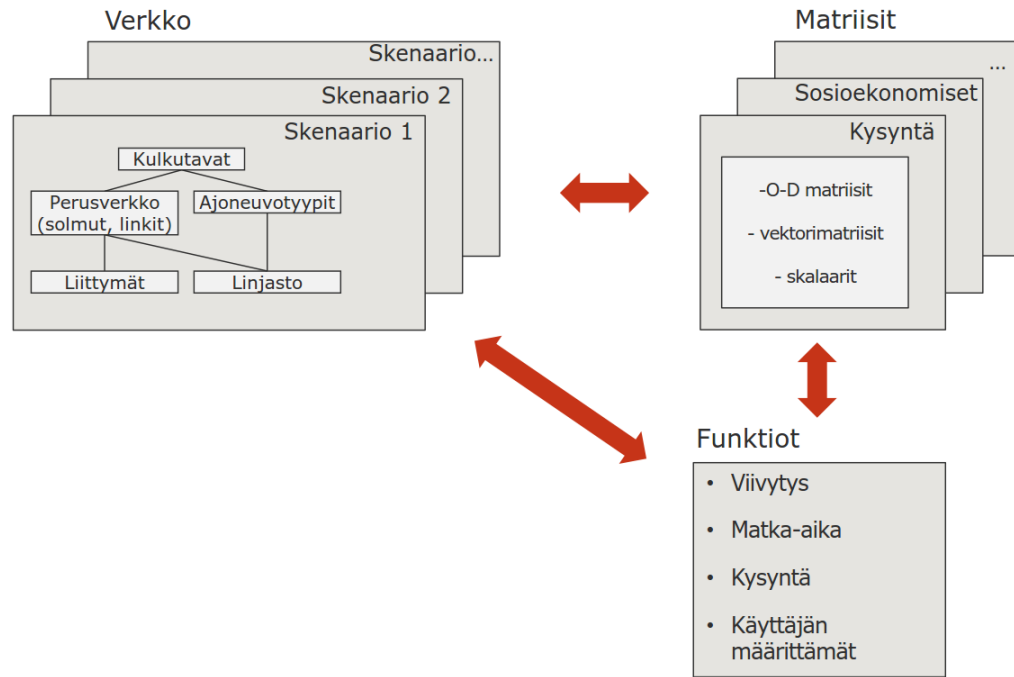
Sijoitteluohjelmistot ovat ohjelmistoja, jotka sisältävät valmiita reitinvalinta-algoritmeja. Ohjelmistot eivät itsessään sisällä valmista mallia, vaan mallin rakentamiseen, esittämiseen ja laskentaan tarvittavia työkaluja. Mallintaja voi melko vapaasti määritellä mallin toimintaa ja samalta näyttävät, samalla ohjelmistolla laaditut ennusteet voivat perustua täysin erilaisiin oletuksiin ja lähtötietoihin. Yleisin Suomessa käytetty sijoitteluohjelmisto on Emme. [25] Toinen maailmalla suosittu ohjelmisto on Visum.

Sijoitteluohjelmistoja käytetään liikennejärjestelmän kokonaisvaltaiseen suunnitteluun ja analysointiin. Erilaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi liikenneverkkosuunnittelu, aikataulusuunnittelu ja hyöty-kustannusanalyysit. [45]

2.4.1 Emme

Emme on kanadalaisen INRO:n kehittämä sijoitteluohjelmisto. Sen kehitys alkoi 1970-luvun lopulla Montrealin yliopistossa kokeellisesta koodista, joka nimettiin EMME:ksi. Ensimmäinen varsinainen ohjelmisto, EMME\2 valmistui 1980-luvun alussa. INRO jatkoi sen kehittämistä vuodesta 1986 alkaen. Vuonna 2007 julkaistiin Emme 3, jonka myötä ohjelmistoon saatiin myös graafinen käyttöliittymä verkkomallien muokkaamiseen. Viimeisin versio on Emme 4, joka sisältää Modellerin, jolla mallien muokkaus ja ajo ei vaadi komentorivin käyttöä. [17]

Emmen tietokantoja kutsutaan emmepankeiksi. Ne koostuvat kolmen tyyppisestä tiedosta: skenaarioista, joissa kuvataan verkkomalli, matriiseista, joilla kuvataan esimerkiksi liikenteen kysyntää ja maankäyttötietoja sekä funktioista, joita käytetään sijoittelussa. [17] Seuraavalla sivulla (Kuva 6) on kuvattu emmepankin rakenne.



Kuva 6 Emmen tietokanta koostuu liikenneverkon kuvauksesta, matriiseista ja funktioista. Käännetty lähteestä [18].

Mallinnettavan alueen liikenneverkkoa kuvataan verkkomallissa, joka koostuu kulkutavoista (*modes*), linkeistä ja solmuista (*links, nodes*) koostuvasta pohjaverkosta (*base network*), joukkoliikennevälineistä (*transit vehicles*), joukkoliikennelinjoista (*transit lines*), jotka koostuvat segmenteistä sekä kääntymisistä (*turns*). Näiden välinen hierarkia on kuvattu yllä (Kuva 6). Tietoja voidaan muokata milloin vain, kunhan tätä hierarkiaa noudatetaan. Esimerkiksi linkkiä ei voida poistaa, jos jokin joukkoliikennelinja kulkee sitä pitkin. Yhdessä nämä tiedot muodostavat skenaarion. [17]

Skenaarion osiin on kohdistettu kolmenlaisia attribuutteja: vakioattribuutit (*standard attributes*), ekstra-attribuutit (*extra attributes*) ja sijoittelun tulokset (*assignment results*). Vakioattribuutit ovat osa verkon määrittelyä. Ekstra-attribuutit ovat vaihtoehtoisia attribuutteja, joita voidaan käyttää tarvittavien tietojen varastoimiseen. Ekstra-attribuuttiin voidaan esimerkiksi tallentaa liikennelaskentatietoa, jotta sitä voidaan verrata ennusteen tuloksiin. Sijoittelun jälkeen tulokset ilmestyvät verkolle. Autoliikenteen sijoittelusta linkeiltä ja kääntymisistä näkee liikennemäärät ja matka-ajat. Joukkoliikenteen sijoittelun jälkeen linkeiltä näkee matkustajamäärät, solmuilta pysäkkien nousijat ja poistujat ja joukkoliikennesegmenteille matka-ajat. [17]

Solmuja on kahta tyyppiä, tavallisia ja sentroideja eli osa-alueiden keskuksia. Solmuilla on aina numero ja koordinaatit, mutta sille voidaan antaa myös muita ominaisuuksia. Solmu voidaan määritellä esimerkiksi pysäkiksi tai liittymäksi. Sentroidit ovat pisteitä,

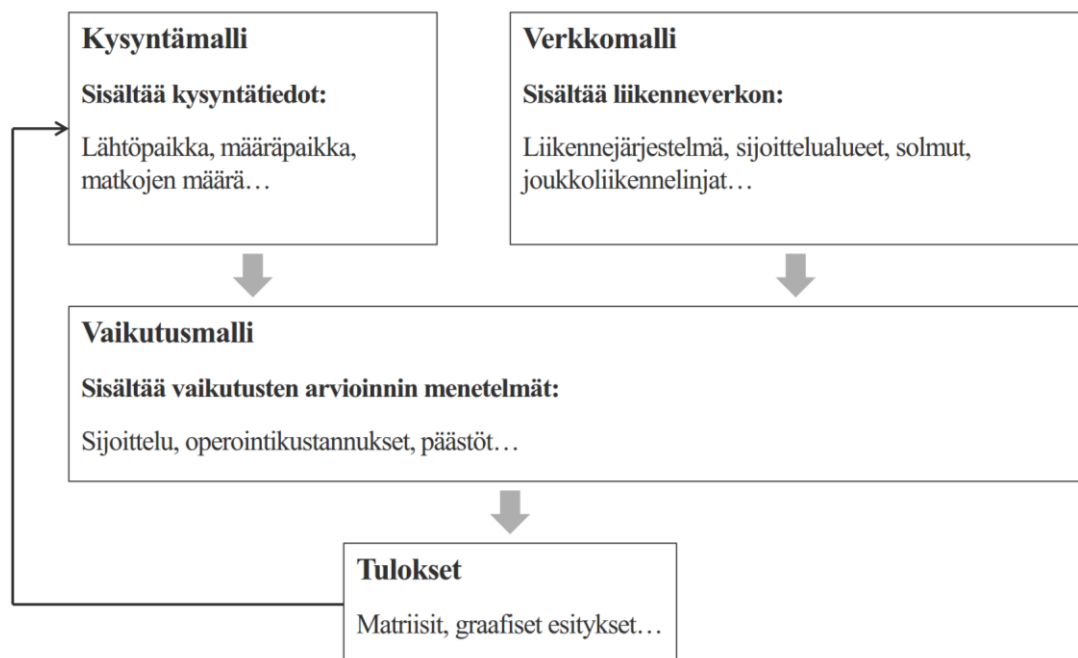
jotka kuvaavat kokonaisen alueen ominaisuuksia ja kaikki kyseisen alueen tuottamat matkat lähtevät samasta pisteestä ja vastaavasti alueen houkuttelemat matkat saapuvat kyseiseen pisteeseen. [8]

Solmut yhdistyvät toisiinsa linkeillä. Linkit ovat aina suunnattuja, eli linkki (i,j) on eri kuin linkki (j,i) . Jos linkin toinen pää on sentroidi, kutsutaan sitä syöttölinkiksi tai konektoriksi. Konektori kuvaa kaikkia alueelta liikenneverkolle tulevia yhteyksiä. Linkki on tavallinen, jos sen molemmissa päissä on tavallinen solmu. Tavalliset linkit kuvaavat tie- ja katuverkkoa. Linkin vakioattribuutteja ovat pituus, kulkutapa, linkkityyppi, kais-tamäärä ja autoliikennelinkeillä viivytysfunktion numero. [8]

Makrolla tarkoitetaan Emmen koodikieltä. Koodi vastaa automaattisesti komentorivin esittämiin kysymyksiin. Makrot helpottavat saman asian toistamista ja pitkien, monimutkaisten aliohjelmien ajamista. Makroilla voidaan esimerkiksi suorittaa laskentaa tai tulostaa yhteenvedoja. [8, 17]

2.4.2 Visum

Visum on liikenteen analyysien ja ennusteiden laatimiseen tarkoitettu ohjelmisto. Sillä voidaan mallintaa joukkoliikennettä ja ajoneuvoliikennettä. Viimeisin versio on Visum 15. Visumissa voidaan kuvata kysyntämalleja, verkkomalleja ja vaikutusmalleja. [45] Alla (Kuva 7) on kuvattu näiden merkitystä ja vuorovaikutusta.



Kuva 7 Visumin rakenne muistuttaa hyvin paljon Emmen rakennetta. Muokattu lähteestä [45].

Visumin verkkomalli koostuu alueista (*zones*), solmuista (*nodes*), linkeistä (*links*), kään-
tymisistä (*turns*), konnektoreista (*connectors*), pysäkeistä (*stops*), joukkoliikennelinjoista
(*lines*) ja suuralueista (*territories*). Näitä objekteja kuvataan attribuuteilla. Attribuutteja
on kolmea erilaista. On syötettäviä attribuutteja, kuten linkin pituus ja numero, sekä tu-
losattribuutteja, kuten nousijat pysäkillä tai liikennemäärä linkillä. Lisäksi on käyttäjän
määrittämiä attribuutteja, joihin käyttäjä voi lisätä haluamaansa tietoa talteen. [45]

Kysyntämalli sisältää kysyntämatriisien lisäksi työkaluja matriisien muokkaamiseen. Vi-
sumissa on valmiina työkaluja, joilla voidaan tuottaa kaikki neliporrasmallin vaiheet. Vai-
kutusmalleilla taas määritetään, miten liikennejärjestelmä vaikuttaa käyttäjiin ja toisin-
päin. Vaikutusmalleja voidaan käyttää esimerkiksi liikennejärjestelmän toimivuuden,
joukkoliikenteen operointikustannusten tai liikenteen päästöjen tarkasteluun. [45]

2.4.3 Joukkoliikenteen sijoittelualgoritmit

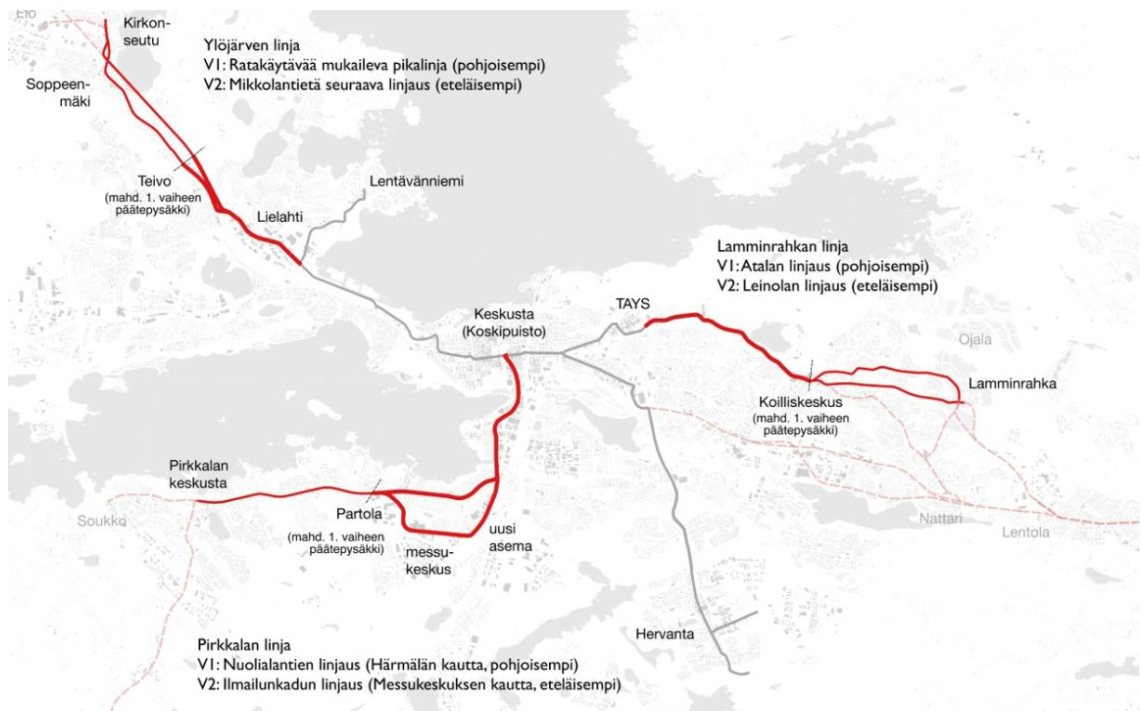
Sijoittelualgoritmit voidaan karkeasti jakaa staattisiin ja dynaamisiin, sekä vuoroväli- ja
aikataulupohjaisiin. Staattiset mallit eivät ota huomioon ruuhkautumisen vaikutusta jouk-
koliikenteen houkuttelevuuteen. Vuorovälipohjainen sijoittelu olettaa, että joukkoliiken-
nelinjat liikennöivät tasaisella vuorovälillä. Ne ovat yleensä staattisia malleja. Aikataulu-
pohjainen sijoittelu taas huomioi todelliset aikataulun mukaiset ajo- ja odotusajat. Ylei-
sesti vuorovälipohjainen sijoittelu on ollut suositumpaa, koska se vaatii yksinkertaisem-
mat lähtötiedot. [35]

Hildebran & Hörtin [15] tutkivat eroja Emmen ja Visumin joukkoliikenteen vuoroväli-
pohjaisissa sijoittelualgoritmeissa. Algoritmit toimivat melko samalla tavalla, eikä niissä
näyttäisi olevan merkittäviä eroja ja ohjelmiston valintaa tärkeämpää onkin keskittyä si-
joitteluparametrien määrittämiseen, koska niillä on suurempi vaikutus. Sijoittelun peri-
aatteissa on kuitenkin pieniä eroja, jotka on hyvä ottaa huomioon sijoittelua suunnitel-
lessa. Emme valitsee houkuttelevimman linjan matka-ajan perusteella ja vertaa sitten
muuta linjoja siihen kokonaismatka-ajan perusteella. Visum taas valitsee houkuttelevim-
man linjan kokonaismatka-ajan perusteella ja vertaa muita linjoja maksimiodotusajan pe-
rusteella. Emme saattaa jättää hieman hitaamman linjan valitsematta, vaikka sillä olisi
tiheämpi vuoroväli. Visum taas saattaa jättää valitsematta linjoja, joilla on pitkä vuoro-
väli, vaikka ne olisivat huomattavastikin nopeampia kuin muut vaihtoehdot. Visumissa
tulee yleensä useampi linja valituksi sijoitteluun kuin Emmessä.

2.5 Tampereen raitiotie

Tampere on noin 220 000 asukkaan kaupunki, jonka väkiluku kasvaa noin 2 000 asuk-
kaalla vuosittain. Kaupungin tavoitteena on tiivistää kaupunkirakennetta ja tähän haas-
teeseen liittyen kaupunkiin rakennetaan raitiotie. [53] Raitiotien ensimmäisessä vaiheessa
rakennetaan osuudet Pyynikintorilta Hervantaan ja Tampereen yliopistolliselle sairaalalle

(TAYS). Toisessa vaiheessa raitiotietä jatketaan Pyynikintorilta länteen kohti Lentävänniemeä. Ensimmäisen vaiheen on tarkoitus valmistua vuonna 2021 ja toisen vaiheen vuonna 2024. [52] Vaiheiden 1 ja 2 lisäksi raitiotielle on kolme mahdollista kehityssuuntaa. Potentiaalisin jatkolinjaus on Koskipuistosta Pirkkalaan. Jo nykyisin Koskipuiston ja Partolan välillä maankäyttö mahdollistaisi raitiotien rakentamisen. Muiden linjojen jatkaminen vaatii ensin maankäytön tiivistymistä. [28] Alla (Kuva 8) ensimmäinen ja toinen vaihe on kuvattu harmaalla ja jatkosuuntia punaisella.



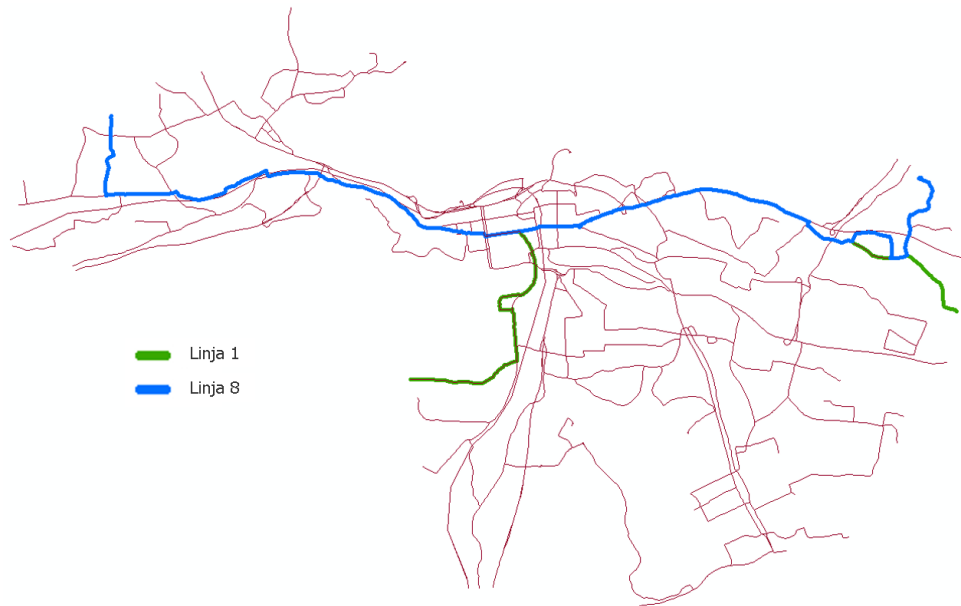
Kuva 8 Tampereen raitiotietä voidaan tulevaisuudessa jatkaa Pirkkalan, Lamminrahkan tai Ylöjärven suuntaan. [28]

Raitiotiellä liikennöidään 7,5 minuutin vuorovälillä [52]. Vaunut ovat noin 37 metriä pitkiä. Niissä on 104 istumapaikkaa ja kokonaiskapasiteetti on 264 matkustajaa. Keskinopeus on 19–22 km/h ja suurin liikennöintinopeus on Hervannan valtavyhlän kohdalla 70 km/h. [54]

2.6 Linjasto2021

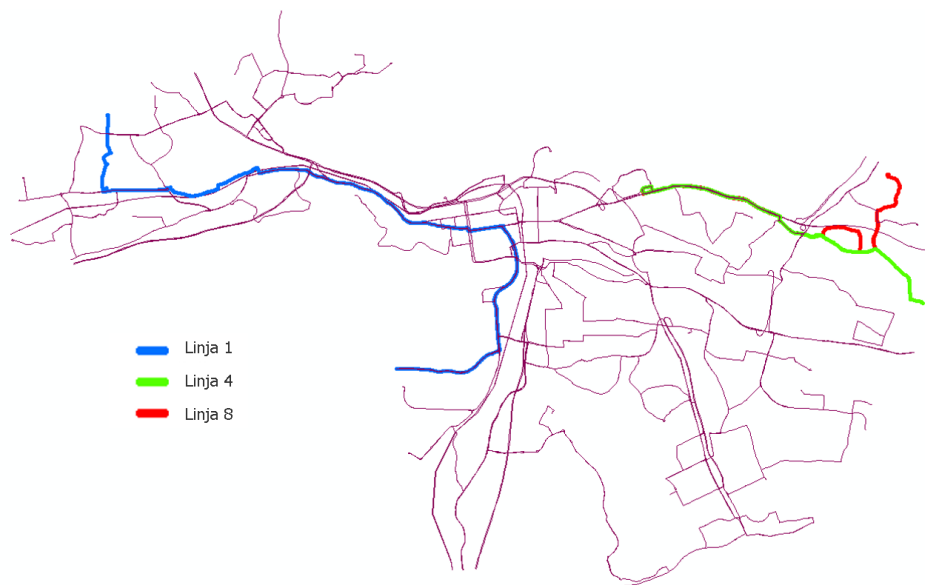
Sujuvan joukkoliikennekokonaisuuden takaamiseksi myös bussien reittejä on muutettava raitiotien liikennöinnin alkaessa. Suunnittelu on käynnissä ja päätös tulevasta linjastosta on tarkoitus tehdä keväällä 2019. Tavoitteena on osallistaa kaupunkilaisia suunnittelun eri vaiheissa. Toistaiseksi on julkaistu kaksi linjastoluonnosta, joita kaupunkilaiset ovat voineet kommentoida. Luonnoksissa huomioitavaa on vaihdollisten matkojen lisääntyminen, koska raitiotie tulee hoitamaan valtaosan joukkoliikenteestä Hämeenkadulla. Keskustassa liikennöivien bussien määrää ei voida lisätä, eivätkä kaikki nykyisetkään linjat

mahdu kulkemaan keskustassa. Raitiotien pysäkit suunnitellaan siten, että vaihtaminen olisi mahdollisimman helppoa ja miellyttävää. [55]



Kuva 9 *Vaihtoehdossa 1 Koillis-Tampereelta pääsee suoraan Pirkkalaan ja Haukiluomaan.*

Vaihtoehdoissa on joitakin eroja. Suurin ero on Koillis-Tampereella, missä nykyiset linjat 1 Vatialasta Pirkkalaan ja 8 Atalasta Haukiluomaan on korvattu vaihdollisilla yhteyksillä ja linja 1 kulkee luonnoksen mukaan Pirkkalasta Haukiluomalle. Lisäksi on lukuisia pienempiä muutoksia muissa Tampereen osissa, kuten uusi poikittaislinja 130 (Lamminpää – Epilä – Lielähti – Ryydynpohja). [55] Yllä (Kuva 9) ja alla (Kuva 10) on kuvattu linjojen 1 ja 8 eroa.

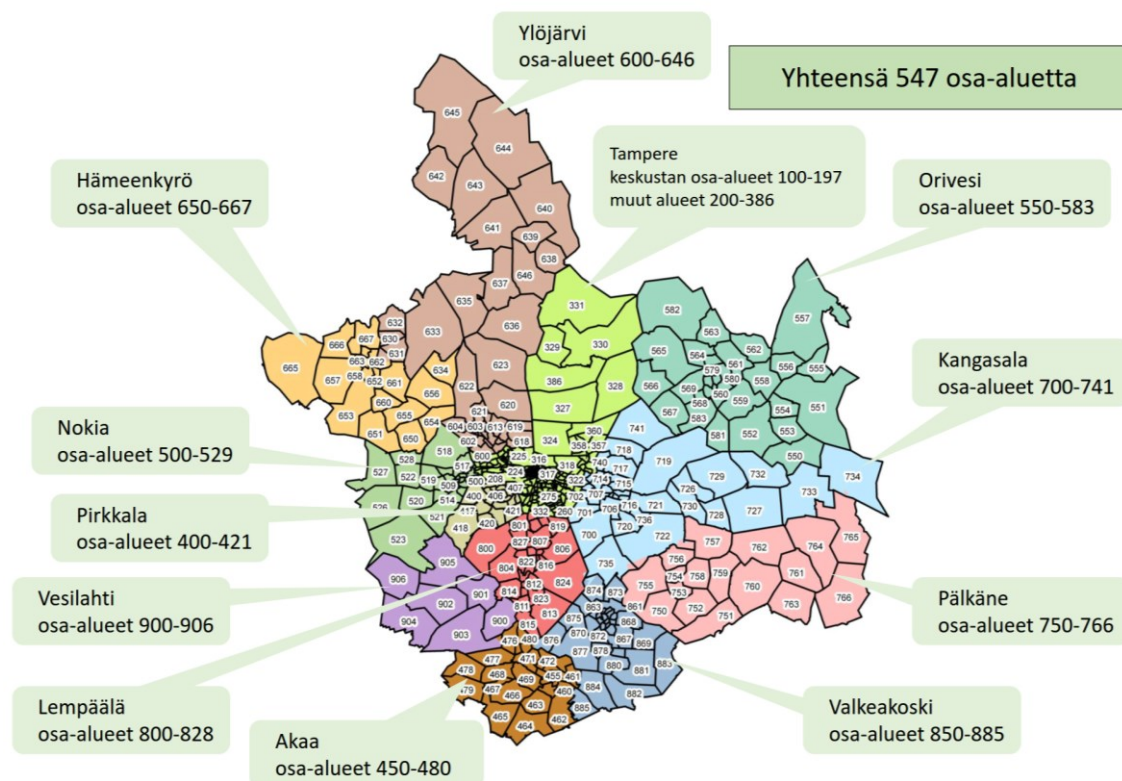


Kuva 10 *Vaihtoehdossa 2 Koillis-Tampereen suorat linjat on korvattu vaihdolla raitiotiehen ja linja 1 ajaa Vatialan sijasta Haukiluomaan.*

3. JOUKKOLIIKENTEN MALLINTAMINEN

3.1 TALLI 2015

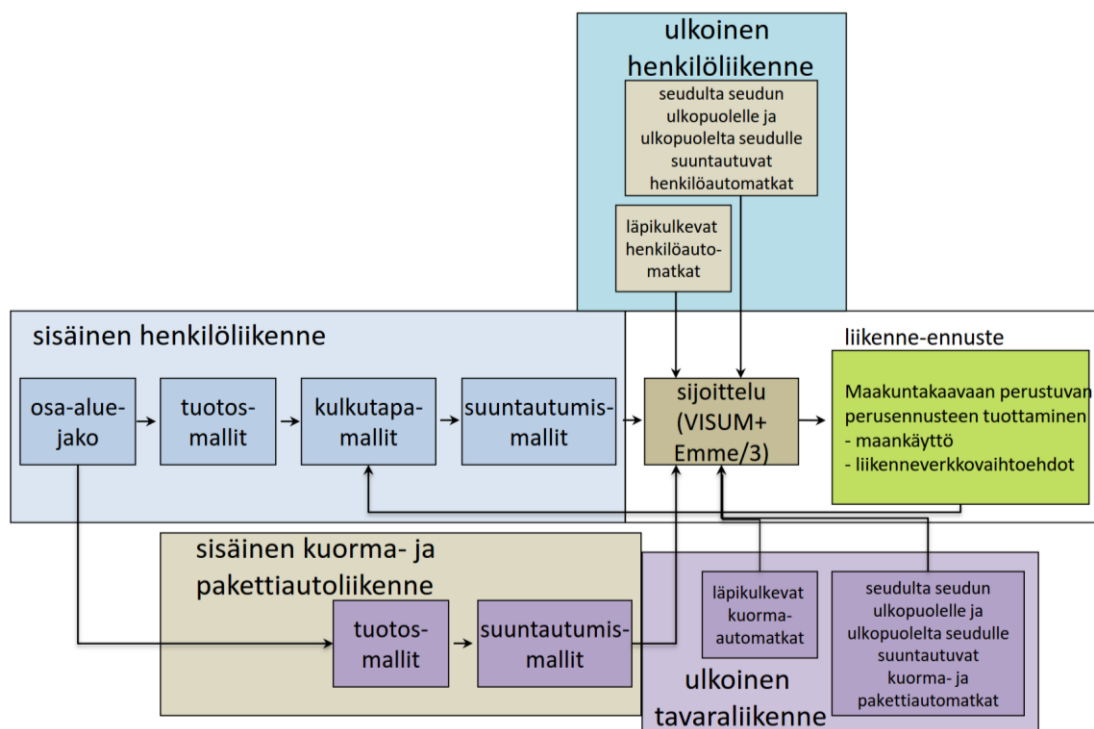
Tampereen seudun liikennemalli TALLI 2015 on neliportainen osa-aluejakoon perustuva malli. Se on laadittu ensimmäisen kerran vuonna 1999 ja sitä on päivitetty vuosina 2002, 2006 ja 2013. Viimeisin päivitys perustuu vuonna 2012 tehtyyn Tampereen kaupunkiseudun ja Pirkanmaan liikennetutkimukseen [23]. Malli kuvaa Tampereen lisäksi Pirkkalan, Lempäälän, Kangasalan, Ylöjärven, Nokian, Vesilahden, Akaan, Valkeakosken, Oriveden, Pälkäneen ja Hämeenkyrön liikennettä. Alue koostuu 547 osa-alueesta, joista 286 on Tampereen alueella ja loput ympäröivissä kunnissa. Lisäksi mallissa on 22 ulkoista aluetta. [22] Mallin osa-aluejako on esitetty alla (Kuva 11).



Kuva 11 TALLI 2015-malli koostuu 547 osa-alueesta, joista 286 on Tampereen alueella. [20]

Mallinnettavia matkaryhmiä on viisi: työmatkat, koulu- ja opiskelumatkat, ostosmatkat, vapaa-ajan matkat ja asiointimatkat. Kaikille matkaryhmille lasketaan sekä kotiperäinen, että ei-kotiperäinen komponentti. [24] Liikennemallissa mallinnettavat kulkutavat ovat

jalankulku, pyöräily, joukkoliikenne ja henkilöauto [22]. Liikennemallin rakenne on kuvattu alla (Kuva 12). Tässä työssä keskitytään lähinnä sisäisen henkilöliikenteen malliin, joka on joukkoliikenteen mallintamisen kannalta merkittävin osa.



Kuva 12 TALLI-mallin toimintaperiaate. [24]

Mallin autoliikenteen verkot on kuvattu Emmeen ja joukkoliikenteen verkot Visumiin. Verkkomalleilla tuotetaan tiedot etäisyyksistä ja matka-ajoista ja sijoitellaan mallin tuottama kysyntä verkolle. [22] Mallin laskenta on toteutettu toisiinsa linkitetyillä Excel-taulukoilla, jotka avataan tietystä järjestyksessä [21]. Mallin osa-alueet on jaettu yhdyskuntarakennetta kuvaaviin vyöhykkeisiin. Tampereen ja Valkeakosken taajama-alueet on jaettu jalankulku-, joukkoliikenne- ja autovyöhykkeisiin. Vyöhykkeitä hyödynnetään matkatuotos-, suuntautumis- ja kulikutapamallissa. [24]

Osamallien estimointi on tehty SPSS tilasto-ohjelmistolla. Estimoinnissa on hyödynnetty suurimman uskottavuuden (*maximum likelihood*) menetelmää. [20] Mallia estimoidaessa nykytilan kuvausta on verrattu seuraaviin tietoihin:

- Kunnittainen matkan pituus matkaryhmittäin
- Kunnittainen ja suuralueittainen kulikutapajakauma
- Tärkeimpien attraktioalueiden laskennalliset matkatuotokset
- Henkilöautoliikenteen laskentatiedot päätie- ja pääkatuverkolta
- Pysäkki- ja linjakohtaiset joukkoliikenteen nousijamäärätiedot

Malli kuvaa melko hyvin nykytilan matkojen pituutta ja kulkutapajakaumaa suuralueta-solla. Väylä- ja linjakohtaisissa tuloksissa on kuitenkin havaittavissa suuriakin poik-keamia, koska mallin tarkkuustaso ei kaikilta osin ole riittävä kuvaamaan todellista ajo-reitin, pysäkin ja linjan valintaa. [22, 24]

Matkustuskysyntä lasketaan matkatuotoksista. Matkojen määrä ja tarkoitus vaihtelee suu-resti eri ikäryhmissä. Matkatuotokset on laskettu mallissa matka- ja ikäryhmittäin sekä vyöhykkeittäin. Tuotosluvut perustuvat Tampereen kaupunkiseudun ja Pirkanmaan lii-kennetutkimukseen. [24]

Kotiperäisten matkojen suuntautumismallit ovat luonteeltaan gravitaatiomalleja, jotka laskevat todennäköisyyden sille, että matka suuntautuu jollekin alueelle suhteessa muihin vaihtoehtoihin (kaava 10). Laskenta tehdään matkavastuksen avulla. Mallia estimoitaessa jokaiselle matkalle arvottiin satunnaiset 20 kohdealuetta, jotta laskentaprosessi ei olisi liian raskas. Yli 20 vaihtoehtoa ei enää merkittävästi paranna mallin selitysasetta. [24] Suuntautumismallin hyötyfunktiossa otetaan huomioon muun muassa matka-aika henki-löautolla, etäisyys lähtö- ja määräpaikan välillä ja kohdealueen attraktiotekijät [22]. Suun-tautuvien matkojen määrä lasketaan matkaryhmittäin erikseen aikuisille (18-vuotta täyt-täneet) ja lapsille (alle 18-vuotiaat). Poikkeuksena kuitenkin työmatkat, jotka mallinne-taan kaikille yhdessä, koska alle 18-vuotiaat eivät juurikaan tee työmatkoja. [21]

Suuntautumismallin parametrit on estimoitu soveltamalla binääristä logistista regressiota. Todellisuudessa havaintoaineiston perusteella valittua määränpäättä on kuvattu arvolla 1 ja arvottuja määränpäitä arvolla 0. Estimoinnissa tuloksia verrattiin ensisijaisesti havain-toaineiston mukaisiin matkojen pituuksiin matkaryhmittäin. [24]

Ei-kotiperäisten matkojen suuntautumismalli on lineaarinen regressiomalli, joka kuvaa matkojen lähtö- ja määräpaikkojen jakautumista eri alueille. Muuttujina on käytetty työ-paikkojen kokonaismäärää, kaupan alan työpaikkojen määrää, majoitus- ja ravintola-alan työpaikkojen määrää, koulutusalan työpaikkojen määrää, päiväkotien määrää, päivittäis-tavarakaupan kokonaispinta-alaa ja myymälöiden kokonaispinta-alaa. [24]

Kulkutavan valinta tehdään logittimallilla (kaava 14), jolla lasketaan osa-aluepareittain kunkin kulkumuodon valintatodennäköisyys. Hyötyfunktioiden parametrit on estimoitu box cox -regression avulla. Estimoinnissa havaintoaineiston mukaan todellisuudessa va-littua kulkutapaa on merkitty arvolla 1 ja muita, valitsematta jääneitä vaihtoehtoja arvolla 0. Mallien kalibroinnissa tärkeimpänä tekijänä on ollut kunnittainen ja matkaryhmittäinen kulkutapajakauma ja nykytilannemallin mukaiset tulokset pyrittiin saamaan mahdollisim-man lähelle toteutuneita. Lisäksi mallin funktioihin on kuvattu matka-aika- ja etäisyys-muuttujia, jotta verkon muutokset vaikuttavat myös kulkutavan valintaan. Joukkoliiken-teen matka-aika on huomioitu kokonaismatka-aikana, jossa huomioidaan kävely-, odo-tus-, vaihto- ja ajoaika. [24] Painokertoimet on kuvattu seuraavalla sivulla (Taulukko 2).

Taulukko 2 Joukkoliikenteen matka-aika koostuu useasta osasta, joita painotetaan eri tavalla. [24]

| matka-ajan osa | painokerroin |
|----------------|--------------|
| kävelyaika | 2,4–3,4 |
| odotusaika | 3,4 |
| ajoaika | 0,8–1,0 |
| vaihtoaika | 8 |
| vaihtosakko | 4 min/vaihto |

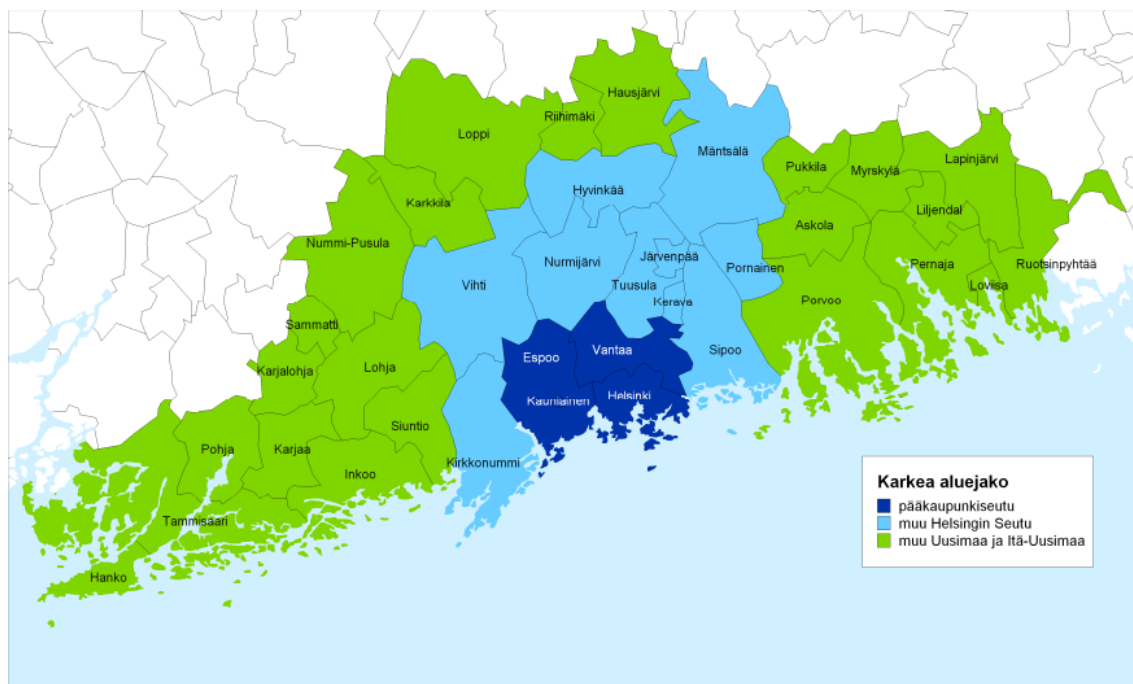
Myös kulkutavan valinta tehdään matkaryhmittäin. Koulu- ja opiskelumatkat on mallinnettu erikseen lapsille ja aikuisille, koska lapset tekevät paljon koulumatkoja. Näin saadut kulkutapa- ja matkaryhmäkohtaiset matriisit summataan kulkutavoittain keskiarkivuorokausiliikenteen (KAVL) matriiseiksi. Lopuksi tehdään symmetrisointi transponoimalla KAVL-matriisi, summaamalla käännetyn ja kääntämättömän matriisin alkiot osa-aluepareittain ja jakamalla summa kahdella, jotta matkamatriiseista saadaan symmetriset. Arki- vuorokausiliikenteen sijaan voidaan tarkastella myös aamu- ja iltahuipputunnin liikennettä. Aamuhuippu on välillä 7–8 ja iltahuippu 16–17. Muunnoskertoimet on määritetty erikseen joukkoliikenteelle ja henkilöautoille matkaryhmittäin. Lisäksi mallissa on erilliset kertoimet kotiin ja kotoa suuntautuville matkoille sekä ei-kotiperäisille matkoille. [21]

Valmis matriisi sijoitellaan Visumissa. Perusverkko on talven 2013–2014 linjasto. Tieverkko on jaettu kuuteen linkkityyppiin. Linja-auton nopeus määräytyy linkkityypin mukaan seuraavasti: 18 km/h (tonttikatu), 23 km/h (kokoojakatu), 40 km/h (nopea katu), 70 km/h (maantie) ja 80 km/h (moottoritie). Linkkinopeuksissa on huomioitu aikataulun mukaiset ajoajat sekä pysäkeille ja liikennevaloihin pysähtyminen. Kuudes linkkityyppi nykyverkolla on rautatie. [24]

Joukkoliikenneverkon sijoittelu on aikataulupohjainen, joten se laskee todelliset odotus- ja vaihtoaajat. Sijoittelussa matka-ajan osien painoarvona käytetään yllä olevia arvoja (Taulukko 2). Ennusteverkolla raideliikenteessä on lisäksi huomioitu raideliikenteen parempaa palvelutasoa raidekertoimella, joka on käytännössä toteutettu kuvaamalla raide- liikenteen ajoaika bussiliikenteeseen verrattuna 0,8-kertaisena. [24]

3.2 Helmet 3.0

Helmet on pääkaupunkiseudun työssäkäyntialueen liikennemalli. Järjestelmässä mallinnetaan erikseen pääkaupunkiseudun kuntien, kehyskuntien ja ympäryskuntien asukkaiden tekemät matkat. Seuraavalla sivulla on esitetty mallin aluejako kunnittain (Kuva 13). Lisäksi mallissa mallinnetaan alueen ulkopuolelta tuleva henkilöliikenne (henkilöauto ja juna), lentoaseman ja matkustajasatamien henkilöliikennekysyntä ja tavaraliikennekysyntä. [9]



Kuva 13 Helsingin työssäkäyntialue on mallissa jaettu kolmeen osaan [10].

Helmet on klassinen neliporrasmalli ja se toimii Emme-ohjelmistossa. Malli on toteutettu lähes kokonaan makrojen avulla. Mallin uusin versio on Helmet 3.0, joka valmistui syksyllä 2017. Mallin perusvuosi on 2016. [9]

3.2.1 Malliprosessin kuvaus

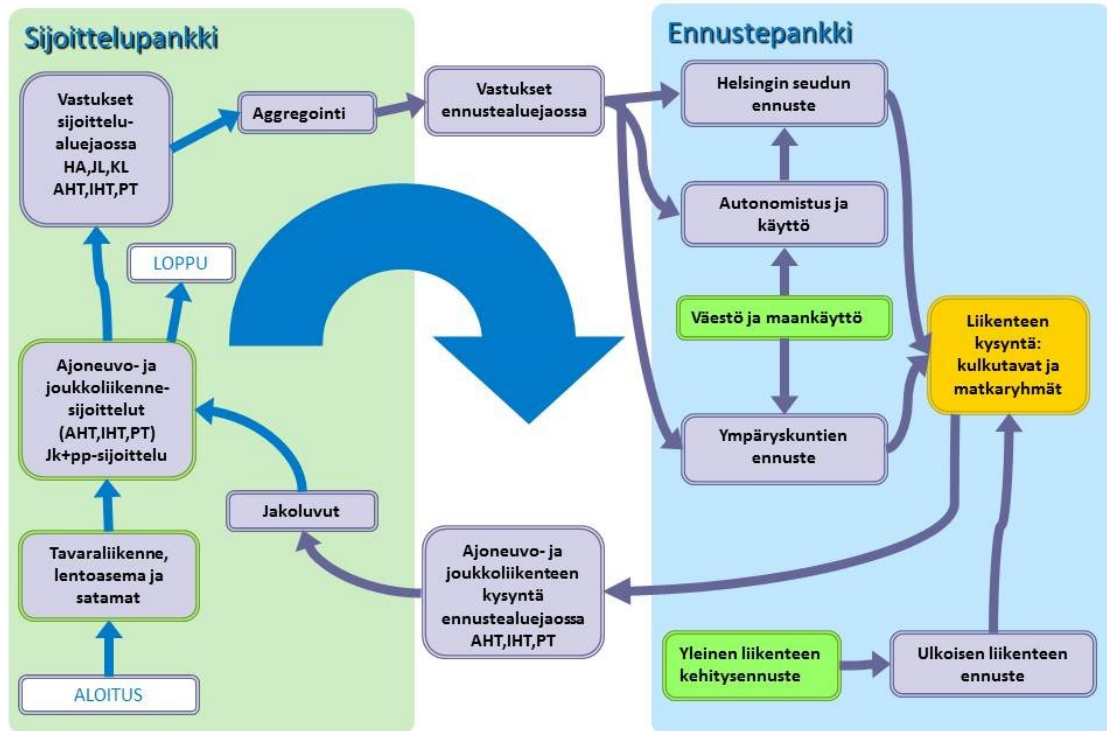
Mallijärjestelmä on jaettu kahteen emmepankkiin: sijoittelu- ja ennustepankkiin. Työssäkäyntialue on jaettu 1918 osa-alueeseen, jotka ovat samat molemmissa pankeissa. Osa-aluejako on tiheämpi pääkaupunkiseudulla ja harvenee mallin laitoja kohti. Osa-alueista 901 on pääkaupunkiseudulla, 852 kehyskunnissa ja 165 ympäryskunnissa. Lisäksi mallissa on 39 ulkosityttöä, joista kolme rautateillä. [9]

Pääkaupunkiseudun kuntia ja kehyskuntia kutsutaan yhdessä nimellä *14 kuntaa*. Niiden mallit ovat rakenteeltaan samanlaisia, mutta kehyskunnissa on käytetty eri kertoimia kuin pääkaupunkiseudulla. Helsingin seudun mallit laskevat ennusteen *14 kunnan* asukkaiden seudun sisällä tekemille matkoille. Matkaryhmiä on yhteensä kuusi:

- Kotiperäiset työ- ja opiskelumatkat
- Kotiperäiset koulumatkat (7–17-vuotiaat)
- Kotiperäiset ostos-, asiointi- ja kyyditysmatkat
- Muut kotiperäiset matkat
- Työperäiset matkat
- Muut kuin koti- ja työperäiset matkat

Tuotokset ja matkamäärät lasketaan matkan aloitusajan mukaan aikajaksoihin. Aamuruuhka on aikavälillä 6:00–8:59, iltaruuhka välillä 15:00–17:59 ja päivä sekä yö väleillä 9:00–14:59 ja 18:00–5:59. [9]

Liikenne-ennustejärjestelmän periaate



Kuva 14 Yksinkertaistettu kuvaus mallin toiminnasta. Ennusteprosessissa käydään läpi kaikki neliporrasmallin vaiheet. [9]

Yllä (Kuva 14) on kuvattu 14 kunnan mallin toimintaperiaate. Ennusteen laadinta alkaa autonomistumallista, jossa väestö jaetaan autollisiin ja autottomiin henkilöihin. Ikäryhmäkohtaisten väestömäärien pohjalta lasketaan matkatuotokset ennustealueille matkaryhmittäin ja aikajaksoittain. Tässä kohtaa Helsingin seudun ja kehyskuntien matkat ovat vielä erillään. Samalla matkamääristä erotetaan jalankulun kysyntä. [9]

Seuraavassa vaiheessa lasketaan jäljelle jääneiden kulkutapojen eli henkilöauton, joukkoliikenteen ja polkupyörien kulkutapaosuudet ja matkojen suuntautuminen logittimalleilla. Koulumatkoille käytetään muista matkaryhmistä selkeästi eroavaa mallia. Näiden tietojen perusteella laaditaan kulkumuodoille alueiden väliset matkamatriisit ja yhdistetään pääkaupunkiseudun ja kehyskuntien matkat. Lopuksi GA-suunnatut matriisit käännetään OD-matriiseiksi. Viimeisellä iteraatiokierroksella GA-matriisille tehdään ensin suuntautumiskorjaus. Lopuksi lasketaan tuntimatriisit aamuhuipputunnille (AHT), iltahuipputunnille (IHT) ja päivätunnille (PT). [9]

Ympäryskuntien mallissa lasketaan ennusteet henkilöautoille ja joukkoliikenteelle kahdessa matkaryhmässä, jotka ovat kotiperäiset työ- ja opiskelumatkat sekä muut matkat. Mallissa huomioidaan kaikki ympäryskunnissa asuvien matkat työssäkäyntialueen sisällä

sekä Helsingin seudulla asuvien matkat ympäryskuntiin ja ympäryskuntien sisällä. Malli on yksinkertaisempi versio Helsingin seudun mallista. Ulkoisen liikenteen mallit laskevat kaikki Helsingin työssäkäyntialueen rajat ylittävät henkilöliikennematkat. Ulkoisen liikenteen mallit ovat kasvukerroin malleja. Niissä ole matkaryhmiä, eikä henkilön asuinpaikalla ole merkitystä. [10]

Sijoittelua varten malliin on kuvattu aamuhuippu-, iltahuippu- ja päivätunnin liikenneverkko, joukkoliikennelinjasto ja kääntymiskiellot. Näiden perusteella lasketaan kunkin tunnin aika- ja etäisyysvastukset sen jälkeen, kun alueiden sisäiset vastukset on lisätty. Joukkoliikennevastuksia leikataan siten, että ensimmäinen odotusaika ei ole kohtuuttoman pitkä. Lisäksi autolinkeille on määritetty ruuhkamaksu (€/km), joka kerrotaan linkin pituudella. Jos maksua ei ole, muuttujan arvo on 0. [9]

Autoliikenne sijoitellaan ajasta, etäisyydestä ja ruuhkamaksuista lasketun yleistetyn vastuksen perusteella. Sijoittelun jälkeen nämä erotellaan omiin vastusmatriiseihinsa ja siirretään ennustepankkiin kulkutavanvalintamallin syöttötiedoiksi. Malliprosessi on siis iteratiivinen. Iteraatiokierroksia toistetaan, kunnes kysyntäennuste voidaan todeta riittävän stabiiliksi tarkasteltavaan ilmiöön nähden. [10] Tavaraliikenteen kysyntä syötetään ennusteprosessin alussa verkolle pohjakysynnäksi, joka ei muutu ennusteprosessin aikana. [9]

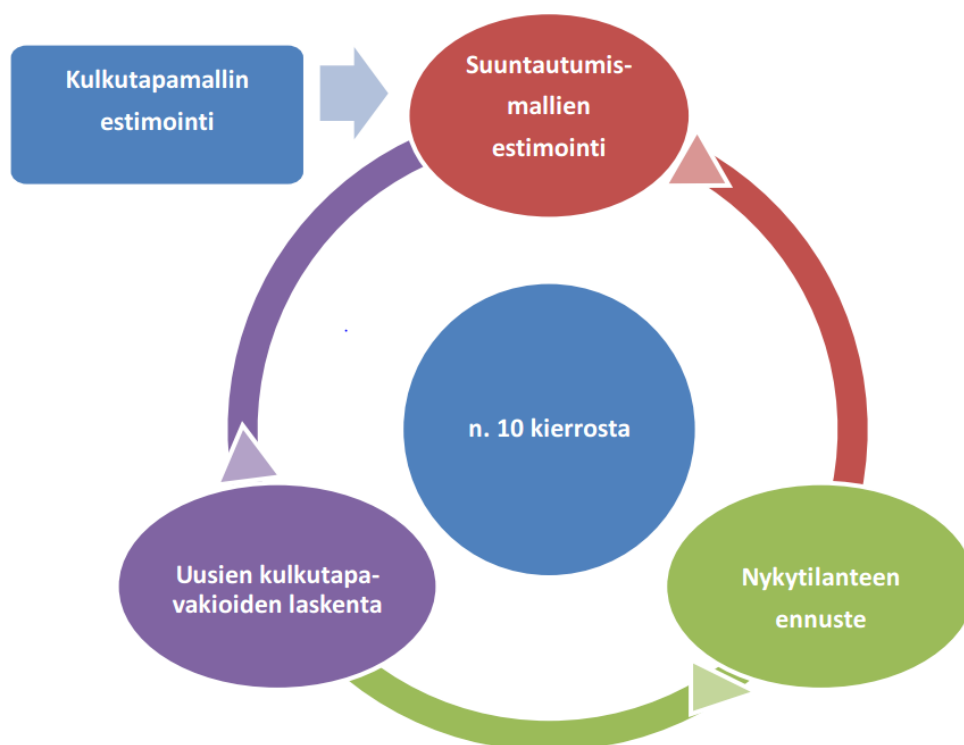
3.2.2 Joukkoliikenteen mallintaminen Helmetillä

Joukkoliikenteen mallintaminen tapahtuu kulkutavan valinnan ja sijoittelun yhteydessä. Kulkutavan valintamalli perustuu logittimalleihin ja se on estimoitu Helsingin seudun liikkumistutkimusten tulosten perusteella. Ensimmäisellä laskentakerralla kulkutapaosuudet poikkeavat usein merkittävästi matkapäiväkirja-aineiston tuloksista. Tämä voidaan korjata kaavalla:

$$c(l) = c(0) - \ln \left[\frac{p(malli)}{p(HEHA)} \right], \quad (16)$$

missä $c(l)$ on uusi kulkutapakohtainen vakio, $c(0)$ on mallin tuottama kulkutapakohtainen vakio, $p(malli)$ on mallilla laskettu kulkutavan valintatodennäköisyys ja $p(HEHA)$ on matkapäiväkirjatutkimuksessa havaittu kulkutapaosuus. [10]

Malli ajetaan uudelleen korjatulla kulkutapakohtaisella vakiolla ja saadut tulokset korjataan jälleen yllä olevalla kaavalla. Prosessi on siis iteratiivinen (Kuva 15). Lisäksi suuntautumismallit estimoidaan uudelleen jokaisen kulkutapamallin kalibroinnin jälkeen, koska kulkutavan valinta vaikuttaa suuntautumismallissa esiintyvään logsumiin. [10]



Kuva 15 Suuntautumismallit estimoidaan kulikutapamallien yhteydessä, jotta kulkutavan valinta tulee huomioitua myös matkojen suuntautumisessa. [10]

Kulkutavan valintamallissa joukkoliikenteen osalta muuttujina käytetään painotettua kokonaismatka-aikaa (minuuttia) ja matkan kustannusta (euroa). Muualla kuin pääkaupunkiseudulla käytetään yleistettyjä matkavastuksia. Yleinen matkavastus voidaan laskea kaavasta

$$\text{Yleistetty matkavastus} = \text{kerroin} * \text{matka-aika} + \text{kustannukset}. \quad (17)$$

Yleistettyä matkavastusta käytetään vain silloin, kun matka-aikaa tai kustannuksia ei muuten saada malliin mukaan. Yleistetyn matkavastuksen kerroin on johdettu ajan arvosta ja se on riippuvainen matkan tarkoituksesta. [10]

Yksittäisten linjojen matkustajamäärät saadaan sijoittelun jälkeen. Eri joukkoliikennemuodot on koodattu verkolle omina kulkumuotoinaan. Kaukoliikenne on jaettu vakio- ja pikavuorobusseihin sekä kaukojuniin. Lähiliikenteen muotoja ovat bussi, metro, lähijuna, raitiovaunu ja pikaraitiovaunu. Joukkoliikenne on kuvattu vuorovälipohjaisena, eli jokaiselle joukkoliikennelinjalle annetaan reitti ja keskimääräinen vuoroväli. [8]

Emme sijoittele joukkoliikenteen siten, että kaikki kahden alueen väliset joukkoliikennematkat lähtevät samalta pysäkiltä. Lähtöpysäkiltä lähteviä houkuttelevia reittivaihtoehtoja arvioidaan houkuttelevuuden mukaan. [8, 58] Houkuttelevuuden vertailu tapahtuu kokonaisvastuksia vertaamalla. Ne koostuvat liityntäkävelyyn kuluvasta ajasta, odotusajasta, ajoneuvon nousuvastuksesta ja ajoajasta. Vastuskomponentteja voidaan painottaa

suhteessa ajoaikaan. Helmetissä käytetään kävely- ja odotusajan painokertoimena 1,5 ja nousuvastuksen painokertoimena 1,0. [8]

Teoreettinen odotusajan maksimi saadaan jakamalla 60 minuuttia pysäkin kautta tunnissa kulkevien linjojen lukumäärällä. Keskimääräiseksi odotusajaksi voidaan ottaa vain osa teoreettisesta odotusajasta. Helmetissä on käytetty kerrointa 0,3, koska oletetaan liikenteen olevan melko säännöllistä ja ihmisten katsovan aikatauluja ennen pysäkillä menemistä. [8]

Mallissa kaikilla joukkoliikennemuodoilla nousuvastus on 1. Lisäksi busseille lisätään linjan pituudesta epälineaarisesti riippuva lisävastus: $t = 1,5 * \sqrt{\text{pituus}}$, jossa pituus on linjan pituus yhteen suuntaan kilometreinä. Nousuvastuksen maksimiarvo on kuitenkin 10 minuuttia, mikä vastaa 36 kilometriä. Lisävastuksella tavoitellaan 5 minuutin eroa junan ja keskivertobussin nousuvastusten välillä. [8]

3.2.3 Helmetin tuottamat ennusteet

Helmet-mallille tehdyissä tilastollisissa testauksissa joukkoliikenteen keskimääräiset matkustajamäärät osuivat hyvin kohdalleen. Paikoittain matkustajamäärät on kuitenkin aliarvioituja ja kulkutapojen välisessä työnjaossa on ollut ongelmia. Erityisesti raideliikenteessä on selvästi liian vähän matkustajia. [8] Yksi syy raideliikenteen liian pieniin matkustajamääriin on, että raideliikenteelle on kuvattu todellisuutta vastaavat nopeudet. Bussien nopeudet puolestaan määritetään sijoittelun yhteydessä ja ovat etenkin bussikais-tallisilla osuuksilla usein liian suuria. Tämä tekee bussista todellisuutta houkuttelevamman vaihtoehdon mallissa. [58] Toinen syy liittyy pyöräilyn mallintamiseen. Malli kuvaa pyörille liian suuren kulkutapaosuuden kantakaupungissa. Tämä johtuu siitä, että mallin kulkutapajakauma kalibroidaan koko seudulle. Ainoa pyöräilyyn vaikuttava tekijä mallissa on etäisyys. Kantakaupungissa monet valitsevat todellisuudessa polkupyörää hitaamman raitiotien, koska keskustan pyöräilyolosuhteet eivät ole optimaaliset. Malli ei osaa ottaa tätä huomioon ja koska keskustassa matkat ovat usein lyhyitä, pyöräilyn osuus korostuu. [59]

Helmet-malli on tarkoitettu ensisijaisesti eri malliskenaarioiden vertailuun, eikä sillä ole tarkoitus tuottaa absoluuttisia numeerisia arvoja matkustajamääristä. Mallista ei pidä katsoa etenkään yksittäisten joukkoliikennelinjojen matkustajamääriä, vaan vähintään tarkastella joukkoliikennekäytävän poikkileikkausta. Mallia ei myöskään kannata käyttää pienten hankkeiden, kuten yhden bussilinjan tai uuden pysäkin tarkasteluun, koska estimoinnista syntyvä vaihtelu on niin suurta verrattuna näiden hankkeiden vaikutuksiin. [58]

3.3 Matkustajamääräennusteet raitiotiehankkeissa

Työssä pyrittiin myös selvittämään, miten matkustajamääriä on ennustettu eri maiden raitiotiehankkeissa. Vastauksia saatiin Ruotsista, Saksasta ja Tanskasta. Lisäksi tietoja saatiin Bergenin raitiotiestä. Ruotsista vastauksia saatiin Norrköpingistä ja Göteborgista. Molemmissa kaupungeissa matkustajamääriä on ennustettu perinteisillä liikennemalleilla. Joukkoliikenteelle ja autoliikenteelle on erilliset mallit. [39, 47] Ainakin Göteborgissa kysyntädata saadaan valtakunnallisesta Sampers-mallista [18]. Molempien kaupunkien mallit ovat niin tuoreita, ettei niiden luotettavuutta ole voitu arvioida [18, 47].

Tanskan Århusissa raitiotien matkustajamääräennusteet tehtiin liikennemallilla, joka mallintaa auto- ja joukkoliikennettä. Ennusteen toimivuutta ei osata vielä arvioida, koska raitiotien kaikkia osia ei ole vielä otettu käyttöön. Alustavasti näyttäisi kuitenkin siltä, että malli on hieman yliarvioinut kysyntää. Tämä johtuu osittain siitä, että maankäyttöennuste ja mallissa oletettu joukkoliikennelinjasto poikkeavat toteutuneista. [50]

Norjan Bergenissä raitiotien ennusteet tehtiin vuonna 2001. SINTEF teki tarkastelun perinteisellä neliporrasmallilla ja Norconsult teki paikkatietoon perustuvan tarkastelun. [44] Ennusteet tehtiin vuodelle 2015. Neliporrasmallilla ensimmäisen vaiheen matkustajamääräksi vuodelle 2015 arvioitiin 26 000. [56] Todellisuudessa tämä ylittyi jo raitiotien avaamisen yhteydessä vuonna 2010 [44]. Paikkatietomenetelmän tuloksia ei ollut saatavilla.

Ennusteissa päädyttiin käyttämään raidekerrointa, koska ilman raidekertoimen vaikutusta malli ennusti raitiotielle vain 12 000 matkustajaa vuorokaudessa. Tämä ei ollut uskottavaa, koska jo vuoden 2002 tilanteessa suunnitellussa raitiotiekäytävässä oli yli 20 000 päivittäistä matkustajaa. [44] Raidekertoimen suuruudeksi tavoiteltiin kymmentä prosenttia. Raidekerroin toteutettiin siten, että raitiotieltä poistettiin vaihtovastus kokonaan. Näin raidekertoimen suuruudeksi tuli noin 8 %. [56]

Paikkatietotarkastelussa päätavoite oli selvittää, kuinka paljon asukkaita saavutetaan raitiotien eri vaihtoehtojen varrella. Raitiotien reittivaihtoehdot jaettiin vyöhykkeisiin, joille määritettiin käyttöasteet. Käyttöaste määritettiin suurimmaksi 2-10 km etäisyydellä keskustasta. Lisäksi jokaisen pysäkin ympäristö jaettiin 200, 400 ja 600 m vyöhykkeisiin. Raitiotien käytön oletettiin vähentyvän kauempana pysäkestä. Alueella asuvien ja työkentelevien määrä kerrottiin näillä kahdella kertoimella, jolloin saatiin arvio pysäkin nousijamäärästä. [44]

Euroopassa tuskin on yhtään raitiotiehanketta, jossa kysyntää ei olisi ennustettu millään tavalla. Yleensä käytössä on neliporrasmalli tai erillinen joukkoliikennemalli. Joukkoliikennemalleilla on tapana arvioida kysyntä alakanttiin. Neliporrasmallissa taas on huo-

mattavasti enemmän vapausasteita, joten uskottavan ennusteen tuottamiseksi mallintajalla pitää olla hyvä ammattitaito. Neliporrasmalleista on kokemuksia sekä yli- että aliarvioista. [14]

3.4 Vaihtoehtoisia malleja

Tässä luvussa käsitellään vaihtoehtoja perinteisille liikennemalleille joukkoliikenteen mallintamiseen. Seuraavalla sivulla (Taulukko 3) on listattu esimerkkejä kirjallisuudessa esiintyvistä malleista. Alaluvuissa 3.4.1–3.4.3 kuvataan eri mallityyppejä tarkemmin.

Mallien käyttötarkoitus ja mallinnettavan alueen suuruus vaihtelevat. Osa malleista on luotu kokonaiselle osavaltiolle, läänille tai vastaavalle useammasta kunnasta koostuvalle alueelle [2, 34]. Loput keskittyvät yhden kaupungin tai metropolin alueelle. Suurin osa on kysyntämalleja, mutta Choin et al. [6] käyttämällä mallilla mallinnetaan myös matkojen suuntautumista. Mallinnettava ajanjakso vaihtelee tunnista vuoteen. Malleilla voidaan ennustaa joukkoliikenteen nousujen määrää pysäkki- tai asemakohtaisesti lukuun ottamatta Man et al. [36] mallia, jossa mallinnetaan nousuja mallin osa-alueittain.

Taulukko 3 Tiivistelmä työssä tarkastelluista malleista.

| Lähde | Mallin tyyppi | Sijainti | Joukkoliikenneväline | Ajanjakso | R ² |
|-------|-----------------|-------------------|------------------------|---|----------------|
| [2] | MLR / GWR | Englanti ja Wales | Juna | Vuosi | 0,799 |
| [13] | MLR (DDR) | Madrid, Espanja | Metro | Kuukausi | 0,753 |
| [6] | DDM | Soul, Korea | Metro | 07:00–09:00; 12:00–14:00; 18:00–20:00 | 0,791 |
| [4] | MLR (OLS) / GWR | Madrid, Espanja | Metro | Kuukausi | 0,70 |
| [3] | GWR | Sidney, Australia | Juna | Viikko | 0,927 |
| [34] | MLR (OLS) | Maryland, USA | Juna, metro, raitiotie | Viikko | 0,812 |
| [57] | MLR [28] | Phoenix, USA | Raitiotie | Arkipäivä | 0,715 |
| [36] | GTWR | Peking, Kiina | Bussi | Arkipäivä tunneittain | 0,9647 |

DDM = Direct demand model eli suora kysyntämalli

DDR = Distance decay regression eli etäisyydestä riippuva regressio

GWR = Geographically weighted regression eli maantieteellisesti painotettu regressio

GTWR = Geographically and temporarily weighted regression eli maantieteellisesti ja ajallisesti painotettu regressio

MLR = Multiple linear regression eli usean muuttujan lineaarinen regressio

OLS = Ordinary least squares method eli pienimmän neliösumman menetelmä

Selitysasetta R^2 käytetään usein kuvaamaan mallin soveltuvuutta kuvata selitettävää muuttujaa. R^2 voidaan laskea kaavalla:

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{Y})^2}, \quad (18)$$

missä \hat{y}_i on arvio y_i :n arvosta (kaava 8) ja \bar{Y} on y :n keskiarvo. R^2 :n arvo vaihtelee nolasta yhteen. Mitä suurempi arvo on, sitä paremmin malli selittää selitettävän muuttujan vaihtelua. [38]

3.4.1 Suorat kysyntämallit

Suorat kysyntämallit ovat malleja, joilla voidaan mallintaa suoraan matkatuotos, suuntautuminen ja kulkutavan valinta. Näin menettelemällä voidaan välttää eri vaiheissa syntyviä virheitä ja huomioida helpommin eri vaiheiden vaikutus toisiinsa. [60]

Tässä työssä tarkasteltavista malleista Choi et al. [6] mallissa käytetään tällaista menetelmää kuvaamaan metron matkustajamääriä asemien välillä. Menetelmä on näistä ainoa, jolla voidaan suoraan mallintaa matkojen suuntautumista. Työssä sovelletaan kerrannaismallia (kaava 19) ja Poissonin regressiomallia (kaava 20).

$$T_{ij} = \phi \prod_{p=1}^P X_{ip}^{\alpha_p} \prod_{p=1}^P X_{jp}^{\beta_p} \prod_{m=1}^M t_{ijm}^{\theta_m}, \quad (19)$$

$$T_{ij} = \exp(\varphi + \sum_{p=1}^P \alpha_p X_{ip} + \sum_{p=1}^P \beta_p X_{jp} + \sum_{m=1}^M \theta_m t_{ijm}), \quad (20)$$

missä T_{ij} on matkojen määrä metrolla asemien i ja j välillä, X_{ip} on p :s asemaan i liittyvä selittävä muuttuja, X_{jp} on p :s asemaan j liittyvä selittävä muuttuja, t_{ijm} on matkavastus asemien i ja j välillä kulkutavalla m , ϕ ja φ ovat skaalausparametrejä, α_p, β_p ja θ_m ovat estimoitavia malliparametreja, P on selittävien muuttujien lukumäärä ja M on tarkasteltavien kulkutapojen lukumäärä.

Tutkimuksessa mallit kuvattiin erikseen aamuruuhkaan kello 7–9, päivälle kello 12–14 ja iltaruuhkaan kello 18–20. Kuvatuista malleista paremmin toimi kerrannaismalli, jonka R^2 -arvot olivat parempia, $R^2 = 0,791$. Jotta voidaan arvioida myös matkojen suuntautumista, jokaiselta asemalta tarvitaan nousijamäärien lisäksi tieto poistujien lukumäärästä. Tutkimuksen empiirinen osa suoritettiin Soulissa, missä on käytössä maksujärjestelmä jossa lippu leimataan sekä noustessa, että poistuessa, mikä helpottaa tällaisen tiedon keräämistä. [6]

3.4.2 Usean muuttujan lineaariset regressiomallit

Yleisesti neliporrasmallin kysyntämalleina käytettäviä regressiomalleja voidaan hyödyntää myös tarkemmissa kysyntätarkasteluissa. Mallit estimoidaan yleisimmin pienimmän neliösumman (OLS) menetelmällä. Menetelmää on kuvattu tarkemmin luvussa 2.2.2.

Tarkastelluista malleista kaksi hyödyntää pienimmän neliösumman regressiota mallissaan [34, 57] ja yksi etäisyydellä painotettua regressiota [13]. Ubruch & Kuby [57] käyttivät Kubyn [29] yhdeksän yhdysvaltalaisen raitiotiekaupungin matkustajamäärillä estimoimaa mallia Phoenixin raitiotien matkustajamäärien arvioimiseen. He vertasivat mallin tuloksia toteumiin ja neliporrasmallilla tehtyyn ennusteeseen. Todellisuudessa matkojen määrä arkivuorokaudessa raitiotien avautuessa vuonna 2009 oli 33 698. Neliporrasmallilla tulokseksi saatiin 26 065 ja regressiomallilla 37 907. Pääosin regressiomalli antoi hyviä tuloksia, mutta pääteasemilla se aliarvioi matkustajamääriä reilusti samoin kuin koripallostadionin ja yliopiston kohdalla. Jälkimmäiset tapaukset voitiin ennakoida, koska mallin tiedot perustuivat ajankohtaan, jolloin koripallokausi ei ole käynnissä ja yliopistopiskelijat ovat lomilla. Suurin syy yliarvioinnille oli kahden keskustassa olevan pysäkin yliarvointi. Kyseisille pysäkeille malli ennustaa yli 3 000 ylimääräistä matkustajaa. [57]

Liu et al. [34] tarkastelivat raideliikenteen matkustajamääriä asemittain Marylandin osavaltiossa Yhdysvalloissa. Tarkasteltavana oli kolme Washingtonista lähtevää rautatielinjaa sekä Baltimoren raitiotie ja metro. Tarkastelut tehtiin erikseen pelkälle raitiotielle, raitiotielle ja metrolle sekä raitiotielle, metrolle ja junalle. Mitä useampi liikennemuoto tarkastelussa on mukana, sitä parempi R^2 -arvo mallilla saadaan. Pelkälle raitiotielle $R^2 = 0,566$, raitiotielle ja metrolle $R^2 = 0,723$ ja kaikille kolmelle $R^2 = 0,812$. Työssä todettiin, että OLS-malli soveltuu matkustajamäärien karkeaan arviointiin ja erityisesti maankäytön vaikutuksia selittäväksi malliksi. Estimoinnin yhteydessä havaittiin merkittäviä eroja raitiotien ja raskaan raideliikenteen kysyntään vaikuttavissa tekijöissä.

Gutiérrez et al. [13] yhdistivät usean muuttujan regressioon etäisyysfunktion, joka ottaa huomioon kävelyetäisyyden pysäkillä tarkastellessaan Madridin metron matkustajamääriä. Mitä lähempänä asemaa matkan lähtöpiste on, sitä todennäköisemmin matkaan käytetään metroa. Malliin määritettiin etäisyysfunktio koti- ja työperäisille matkoille. Etäisyydet mitattiin paikkatieto-ohjelmasta todellisina etäisyyksinä ja palvelualue rajattiin 800 metriin asemasta. Kotiperäisille matkoille etäisyysfunktio oli lineaarinen ja työpaikoille eksponenttifunktio. Mallin tuloksia verrataan havaittuihin matkoihin ja korrelaation R^2 -kertoimeksi saatiin 0,757. Vastaavasti neliporrasmallin R^2 -kerroin oli 0,8108. Huomattavasti kevyempi malli siis kuvasi vaihtelua pysäkkikohtaisesti lähes yhtä hyvin.

3.4.3 Maantieteellisesti painotettu regressio

Maantieteellisesti painotettu regressio (*GWR, geographically weighted regression*) on kehittyneempi regressiomalli, joka huomioi alueelliset vaihtelut. Malli voidaan kirjoittaa muotoon:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i, \quad (21)$$

missä y_i on ennustettava arvo alueella i , $\beta_k(u_i, v_i)$ estimoitava parametri koordinaattipisteessä (u_i, v_i) , x_{ik} alueeseen i liittyvä selittävä muuttuja, ε_i virhetermi, k selittävien muuttujien lukumäärä. Toisin kuin pienimmän neliösumman menetelmä ja muut globaalit regressiomallit, GWR ei oletta estimoitavien parametrien olevan samoja eri alueilla, vaan niiden arvo voi vaihdella. Tämä mahdollistaa paikallisten olosuhteiden tarkemman huomioimisen, ja alueellisen analyysin. Tässä työssä tarkastelluissa tutkimuksissa GWR antaa poikkeuksetta luotettavampia tuloksia kuin globaalit mallit. [2-4, 38]

GWR:n parametrit estimoidaan painotetulla pienimmän neliösumman menetelmällä:

$$\hat{\beta}_i = (X^T W_i X)^{-1} X^T W_i y, \quad (22)$$

missä $\hat{\beta}_i$ sisältää estimoitavat parametrit, X selittävät muuttujat ja y havaitut arvot. W_i

on diagonaalinen matriisi $W_i = \begin{bmatrix} W_1(i) & & & \\ & W_2(i) & & \\ & & \ddots & \\ & & & W_k(i) \end{bmatrix}$, joka sisältää painotusker-

toimet, jotka lasketaan ytimen (*kernel*) avulla. Kaksi yleisintä ydintä ovat Gaussin funktio (kaava 22) ja *bi-square* funktio (kaava 23)

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2b^2}\right), \quad (23)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} \left(1 - \frac{d_{ij}^2}{b^2}\right)^2, & \text{kun } d_{ij} < b, \\ 0, & \text{kun } d_{ij} \geq b \end{cases}, \quad (24)$$

missä w_{ij} on painokerroin pisteelle j regressiopisteen i lähellä, d_{ij} on etäisyys pisteiden välillä ja b on leveysparametri (*bandwidth parameter*). Tämä parametri voi olla joko vakio (*fixed kernel*) tai muuttua regressiopisteen mukaan (*adaptive kernel*). Jälkimmäistä kannattaa suosia, jos pisteiden tiheys vaihtelee mallialueella. [5, 38]

Leveysparametrin (*bandwith*) optimointi tehdään yleisimmin minimoimalla joko ristiin validoinnin (*cross-validation, CV*) arvoa tai Akaiken vertailulukua (*AIC, Akaike's information criterion*). CV voidaan laskea kaavasta:

$$CV = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{\neq i}(b))^2, \quad (25)$$

missä $\hat{y}_{\neq 1}(b)$ on y_i :n optimaalinen arvo, jonka se saa, kun regressiopiste i jätetään pois mallin kalibroinnista. AIC puolestaan on R^2 :a vastaava yhteensopivuutta kuvaava luku. Se voidaan laskea kaavasta:

$$AIC = 2n * \ln(\hat{\sigma}) + n * \ln(2\pi) + n + tr(\mathbf{S}), \quad (26)$$

missä n on otoskoko, $\hat{\sigma}$ on virhetermin keskivirhe ja $\mathbf{S} = \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}$, eli niin sanottu hattumatriisi. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että jos AIC-arvot eroavat 3:lla, on mallien välillä eroa. Mitä pienempi arvo on, sitä paremmin malli kuvaa ennustettua ominaisuutta. [5, 38]

Kaikissa tarkastelluissa tutkimuksissa GWR-mallin lisäksi estimoititiin myös globaali regressiomalli [2-4]. Regressioanalyysi kannattaakin aloittaa globaalilla mallilla, joka soveltuu paremmin tilastollisesti merkitsevien muuttujien määrittämiseen, ja vasta sen jälkeen estimoida GWR-malli samoilla muuttujilla. [11]

Blainey [2] hyödynsi maantieteellisesti painotettua regressiota tarkastellessaan junaliikennettä asematasolla Englannissa ja Walesissa. Tulokset eivät kuitenkaan olleet merkittävästi parempia GWR:llä kuin globaalilla mallilla (GWR $R^2 = 0,780$ ja OLS $R^2 = 0,750$). Malli kalibroitiin kansalliselle tasolle ja sen kuvaavuus oli parempi urbaaneilla alueilla kuin haja-asutusalueilla. GWR-malliin ei voida sisällyttää binäärimuuttujia [11]. Siksi tutkimuksessa hyödynnettiin GWR4-ohjelmiston [41] ominaisuutta, jossa osa muuttujista voidaan kiinnittää globaaleiksi.

Lisäksi Blainey on yhdessä Corinne Mulleyn [3] kanssa toteuttanut GWR-mallin myös Sidneyyn seudun raideliikenteen asemakohtaiseen mallintamiseen. Myös tässä mallissa hyödynnettiin edellä mainittua mahdollisuutta määrittää osa muuttujista globaalisti. Näin saatiin hieman parempi kuvaavuus ($R^2 = 0,927$), kuin pelkällä GWR-mallilla ($R^2 = 0,925$). Molemmat olivat parempia kuin pelkällä globaalilla mallilla saatu $R^2 = 0,889$.

Cardozo et al. [4] käyttivät GWR-mallia Madridin metron matkustajamäärien mallintamiseen. Globaalilla mallilla he saivat R^2 -arvoksi 0,56 ja GWR-mallilla 0,70. Maantieteellisesti painottamalla saatiin siis huomattavasti parempi kuvaavuus mallille kuin globaalilla mallilla. R^2 -arvoja ei voida suoraan verrata Gutiérrezin et al. [13] vastaaviin, koska käytössä on eri määrä muuttujia.

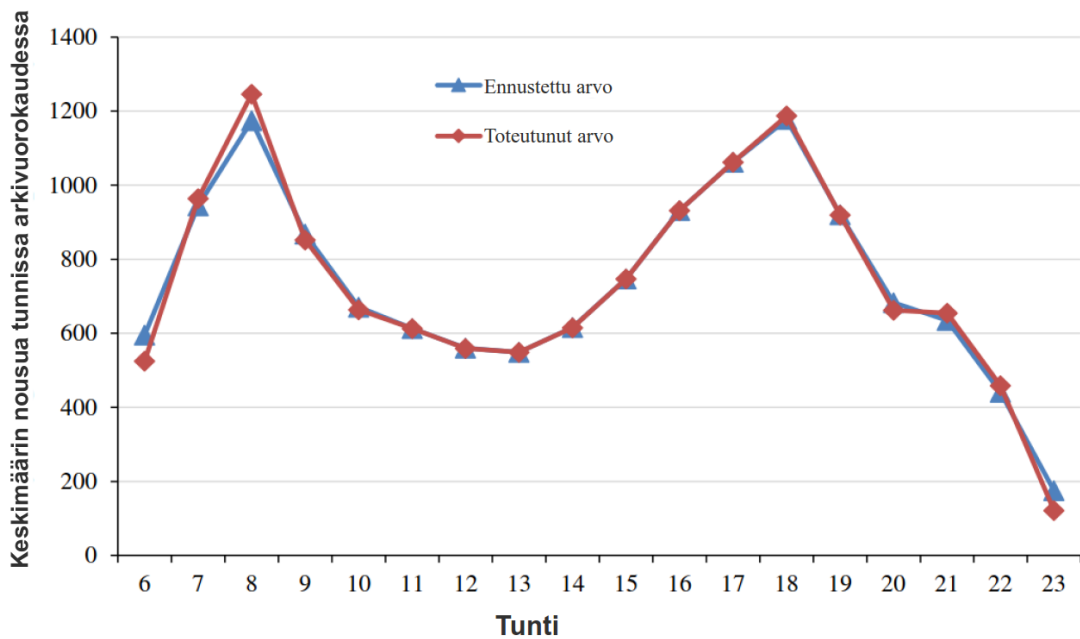
GWR-malleja voidaan estimoida suoraan paikkatieto-ohjelmistossa, kuten ArcGIS:ssä [11]. GWR4 on erityisesti maantieteellisesti painotettujen regressiomallien kalibrointiin suunniteltu avoimen lähdekoodin ohjelmisto [41]. Lisäksi joihinkin tilasto-ohjelmiin, kuten R:ään, on lisätty mahdollisuus GWR-mallin estimointiin [1].

3.5 GTWR

Vielä kehittyneempi malli on maantieteellisesti ja ajallisesti painotettu regressio (*geographically and temporarily weighted regression, GTWR*). Ma et al. [36] hyödynsivät tätä Pekingissä Kiinassa bussimatkustajien mallintamiseen. Kun vertaillaan mallin tuottamaa ennustetta ja toteumaa (Kuva 16), voidaan todeta, että malli kuvaa nykytilaa hyvin. Ku-
vassa on esitetty vertailu rautatieaseman ympäristön nousijamääristä tunneittain todelli-
suudessa ja mallinnettuna. Yleisesti malli voidaan kirjoittaa muotoon:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i)x_{ik} + \varepsilon_i, \quad (27)$$

missä y_i on alueen i vaste, x_{ik} selittäviä muuttujia, $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ estimoitavia parametreja koordinaattipisteessä (u_i, v_i) , ajanhetkenä t_i . ε_i on virhetermi. Myös GTWR-malli esti-
moidaan painotetulla pienimmän neliösumman menetelmällä. Man et al. mallin sopivuus
on $R^2 = 0,9647$. Vertailukohdiksi tuotetut OLS- ($R^2 = 0,153$) ja GWR-mallit ($R^2 = 0,406$)
suoriutuvat huomattavasti heikommin.



Kuva 16 Pekingin rautatieaseman ympäristön joukkoliikenteen nousijamäärät ennustet-
tuna GTWR:llä [36].

3.6 Joukkoliikenteen kysyntään vaikuttavien tekijöiden määrit- täminen

Lineaariset regressiomallit ovat hyviä selittäviä malleja, joten niillä voidaan tutkia maan-
käytön, joukkoliikennetarjonnan ja sosioekonomisten tekijöiden vaikutuksia joukkoli-
kenteen kysyntään. Esimerkiksi Currie et al. [7] tutkivat joukkoliikenteen kysyntään vai-
kuttavia tekijöitä Australiassa, Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa. Holmgren [16] taas

tutki asuinkunnan tulojen muutoksen vaikutusta joukkoliikenteen käyttöön Ruotsissa. Lisäksi kaikissa edellisen luvun malleissa määritettiin aluksi joukkoliikenteen kysyntään vaikuttavat tilastollisesti merkitsevät tekijät.

Regressioanalyysi aloitetaan tarkasteltavan muuttujan valinnalla. Joukkoliikenteen tapauksessa se on yleisimmin nousijamäärä pysäkillä tai joukkoliikenteen kulkutapaosuus alueella. Seuraavaksi valitaan selittävät muuttujat. Tämä vaatii yleensä hyvää esityötä, jotta kaikki mahdolliset mitattavissa olevat tekijät tunnistetaan. Kun muuttujat on valittu ja lähtötiedot kerätty, voidaan ajaa regressiomalli. [12]

Mallin tuloksista voidaan päätellä, mitkä tekijät ovat tilastollisesti merkitseviä. Mallin parametreille estimoiduille arvoille voidaan tehdä tilastollisia testejä, joiden perusteella voidaan arvioida muuttujien merkitsevyyttä. Kertoimen suuruus on ensimmäinen tarkasteltava asia. Mitä suurempi kertoimen itseisarvo on, sitä suurempi vaikutus sillä on mallin toimintaan. Itseisarvon suuruus on riippuvainen myös selittävän muuttujan itseisarvosta. Lisäksi on tärkeää tarkastaa, että kertoimien etumerkit vastaavat odotuksia. [12] Jos pidempi etäisyys pysäkille lisää matkustushalukkuutta, on mallissa todennäköisesti virhe. Regressioanalyysissä tulokset voivat joskus vaikuttaa epäloogisilta. Esimerkiksi Currie et al. [7] saivat tulokseksi, että mitä hitaampi linja on, sitä enemmän se houkuttelee matkustajia. Tämä johtuu siitä, että suuret matkustajamäärät lisäävät pysähdysten kestoa ja määrää, mikä hidastaa linjan nopeutta ja aiheuttaa tilastollisen harhan.

Kertoimelle voidaan laskea myös todennäköisyys, jolla se saa arvokseen nolla. Mitä suurempi tämä todennäköisyys on, sitä pienempi vaikutus muuttujalla on selitettävään muuttujaan. Yleensä tämän todennäköisyyden (p-arvo) rajana käytetään arvoa 0,05. Tällöin 95 %:n varmuudella muuttuja saa jonkin muun arvon kuin 0. Jos p-arvo jollekin muuttujalle on suurempi kuin 0,05, kannattaa se yleensä jättää pois mallista. Lisäksi on syytä tarkastaa, etteivät muuttujat korreloi keskenään, tai ettei tuloksissa ole vinoumaa. Jotta malli saadaan optimoitua ja löydetään tärkeimmät selittävät tekijät, on syytä tarkastella useita eri muuttujayhdistelmiä. [12]

Edellisessä luvussa käsiteltyjä malleja laadittaessa on tehty vastaavia tutkimuksia. Jotkin tekijät toistuvat lähes kaikissa malleissa. Tällaisia ovat vuoroväli, liityntäpysäköinti autolla tai pyörällä, pysäkin etäisyys keskustasta, asukkaiden ja työpaikkojen lukumäärä aseman tai pysäkin läheisyydessä, autonomistus ja liityntäbussit.

Kaikki mahdolliset kysyntään vaikuttavat tekijät eivät kuitenkaan ole mitattavissa. Tällaisia ovat esimerkiksi matkustusmukavuus ja turvallisuuden tunne. Laadullisia ja psykologisia tekijöitä on kuitenkin yritetty kuvata malleihin. Paras esimerkki tästä on raidekerroin. Raideliikenteen on todettu houkuttelevan enemmän matkustajia kuin linja-auton, vaikka mitattavissa olevat tekijät olisivatkin järjestelmien välillä yhtä suuret. Tämän ilmiön kuvaamiseksi on kehitetty empiirinen kerroin, jolla ilmiö voidaan huomioida. Sen

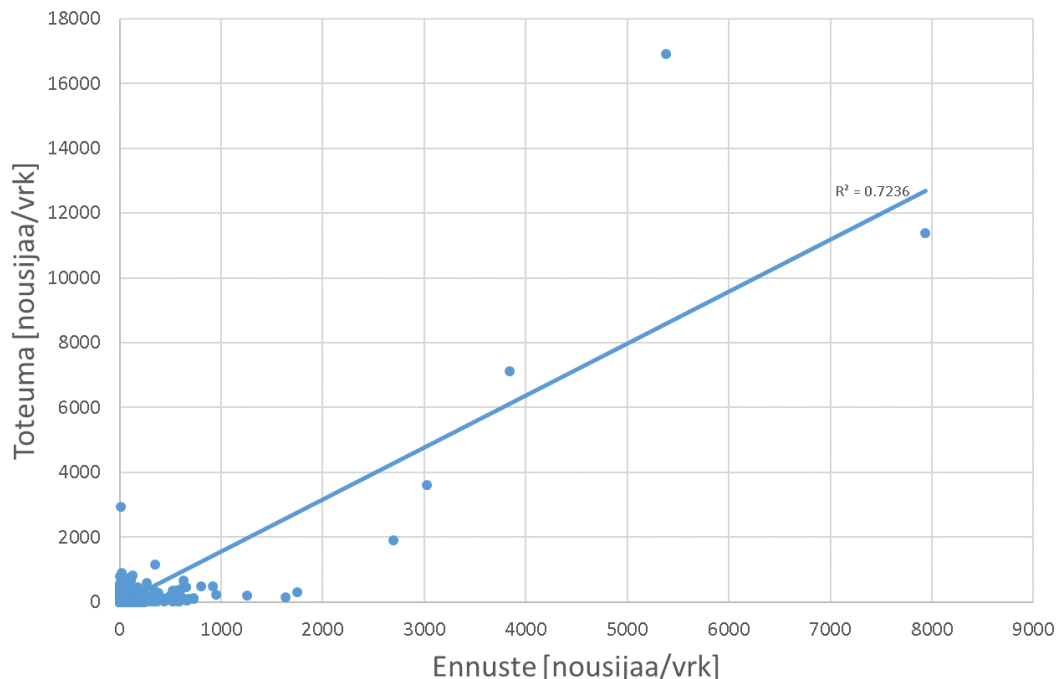
suuruutta ei kuitenkaan voida yleistää, vaan se pitää määrittää paikallisesti ja tapauskohtaisesti. Tämä johtuu siitä, että se perustuu psykologisiin ja sosiaalisiin tekijöihin, joiden merkitys vaihtelee alueittain. [48]

4. MATKUSTAJAMÄÄRÄENNUSTEET TAMPEREELLA

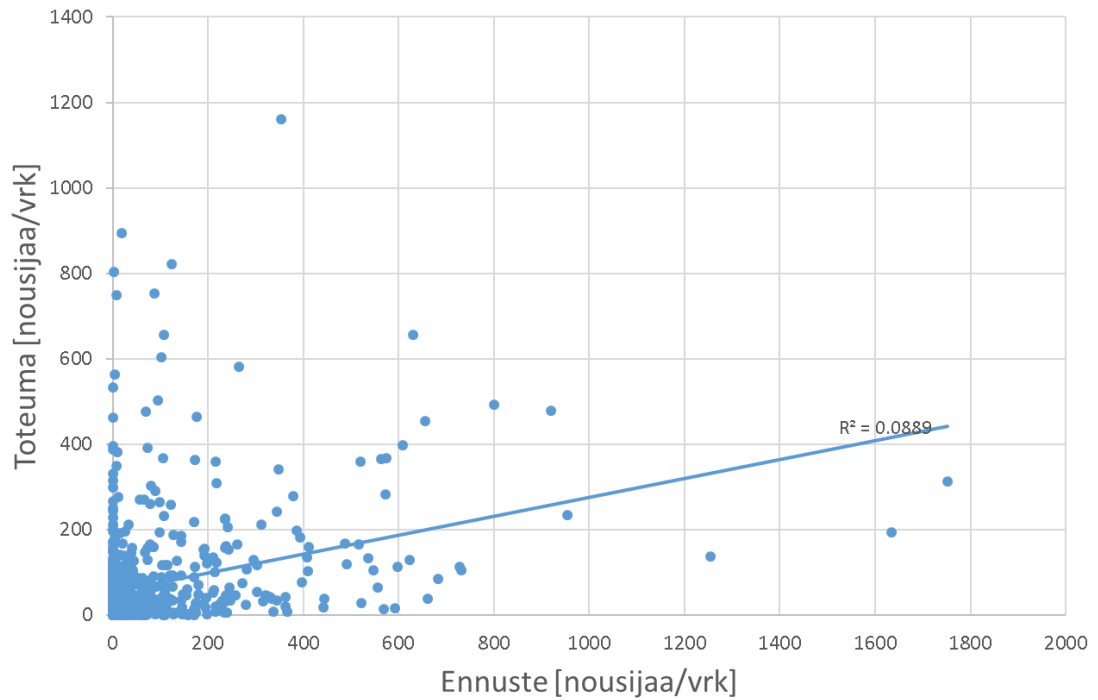
4.1 Mallin nykytilan vertailu toteutuneisiin matkustajamääriin

TALLI-mallin testaamiseksi sen nykytilaennusteita verrattiin toteutuneisiin matkustajamääriin. Tarkastelu tehtiin vuoden 2016 ennusteille. Vertailussa oli tarkoituksena selvittää, kuinka hyvin mallin ennustamat nousijamäärät vastaavat toteutuneita nousijamääriä. TALLI-mallilla ja nousijatilastolla ei ole yhteistä tunnusta pysäkeille, joten tiedot jouduttiin yhdistämään pysäkin nimen perusteella, mikä tuo jonkin verran epävarmuutta tuloksiin ja rajoittaa tarkastelun laajuutta pysäkeille, joille voitiin riittävän luotettavasti määrittää molemmat arvot.

Alla (Kuva 17 ja Kuva 18) on esitetty ennusteen ja toteuman hajontakuvaaja. Pysäkkitaluston tuloksissa on hajontaa, mutta pysäkeillä, joilla kysyntä on pientä, hajonta jakautuu melko tasaisesti keskilinjan molemmiin puoliin ja kokonaismatkustajamäärä on lähellä oikeaa. Tätä tukee se, että verkostotasolla malli ennustaa Tampereen seudulle noin 143 000 joukkoliikennematkaa vuorokaudessa vuonna 2016, kun nousutilaston toteuma vuonna 2017 on noin 157 000 matkaa vuorokaudessa. Ennuste on siis noin 9 % liian pieni. Myös pysäkkitarkastelussa mukana olleilla pysäkeillä mallin ennustama kokonaiskysyntä on noin 15 000 matkaa pienempi kuin toteuma.

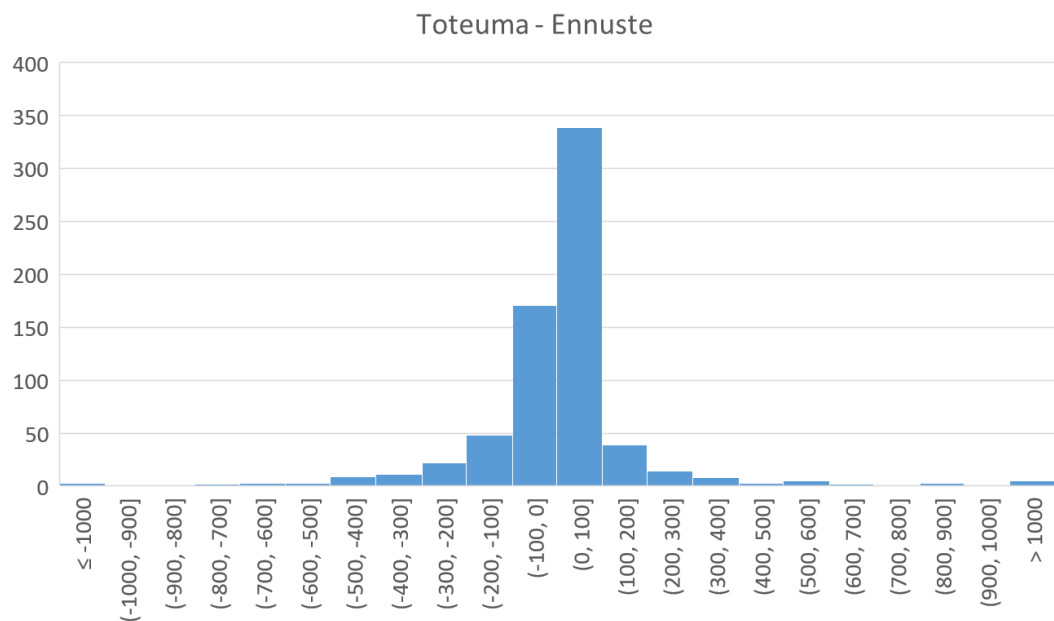


Kuva 17 TALLI-mallin tulokset verrattuna toteumaan.



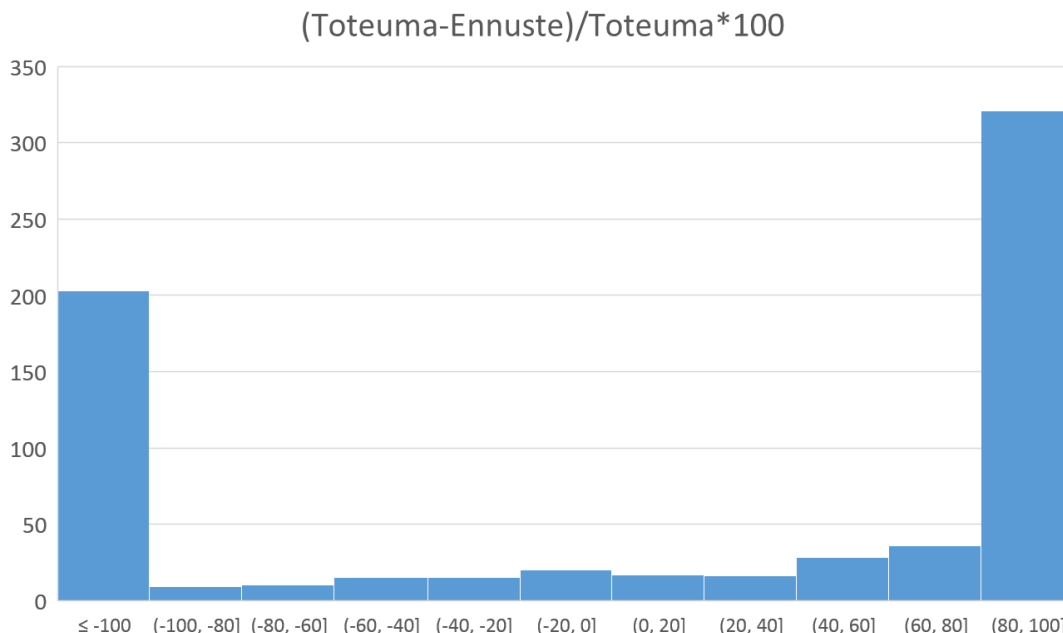
Kuva 18 Pienen kysynnän pysäkeillä malli kuvaa matkustuskysyntää heikommin.

Alla (Kuva 19) on histogrammi, jossa on kuvattu ennusteen absoluuttinen virhe. Malli vaikuttaa ennustavan pysäkkitason nousijamääriä melko hyvin. Noin 75 % tapauksista virhe on alle 100 matkustajaa ja 50 % tapauksista alle 50 matkustajaa.



Kuva 19 Ennusteen absoluuttiset virheet ovat pääosin pieniä.

Tulosta kuitenkin vääristää se, että useilla pysäkeillä nousijoita on alle kymmenen. Tällöin pieneltä vaikuttava ero ennusteessa voi olla suuri suhteessa pysäkin todellisiin matkustajamääriin. Tämä käy ilmi histogrammista (Kuva 20), johon on kuvattu ennusteen virhe suhteessa toteumaan. Vain noin 13 %:lla tapauksista virhe on pienempi kuin 50 %.



Kuva 20 Suhteellinen virhe kuvaa mallin toimintaa paremmin kuin absoluuttinen virhe.

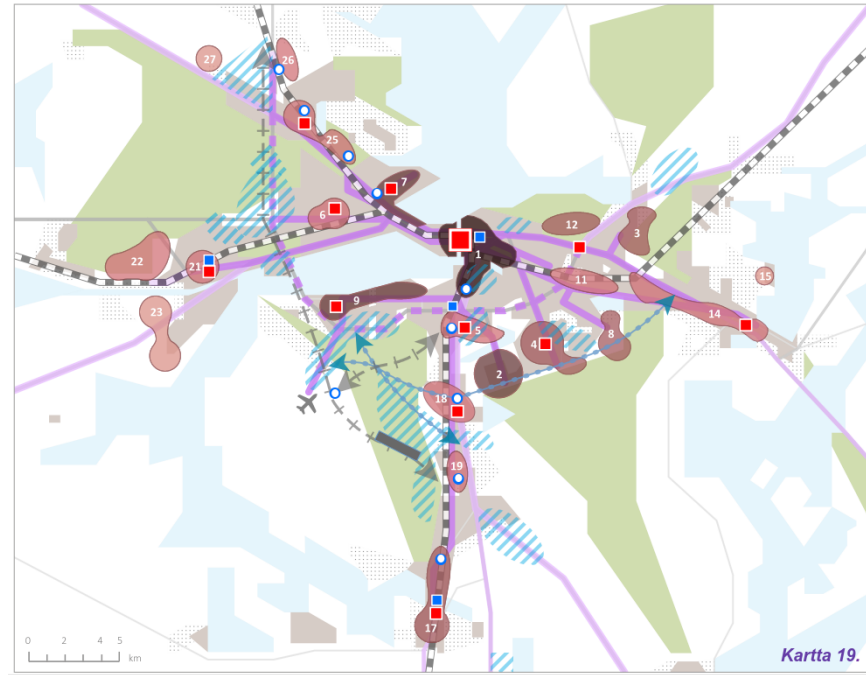
TALLI näyttäisi kuvaavan melko hyvin koko seudun joukkoliikenteen kysyntää, mutta pysäkkitasolla tulokset eivät ole luotettavia. Malli ennustaa suuria matkustajamääriä pysäkeille, joilla ei pitäisi olla juurikaan kysyntää ja vastaavasti joillekin pysäkeille malli ei ennusta yhtään matkustajaa, vaikka todellisuudessa niitä on satoja. Lisäksi suuria eroja on liikenteen solmukohdissa, kuten Keskustorilla, jonne malli ennustaa noin 12 000 matkustajaa vuorokaudessa liian vähän.

4.2 Raitiotien ennusteet

Raitiotien ennusteet on viimeisin joukkoliikennehanke Tampereella, johon on laadittu ennusteet. Virallinen ennuste tehtiin TALLI-mallilla [22]. Eero Kauppinen [27] on puolestaan määrittänyt ennusteen, joka perustuu maankäytön tiivistymiseen raitiotien vaikutusalueella.

Raitiotien ennusteet laadittiin yleissuunnitteluvaiheessa vuosille 2020, 2030 ja 2040 [22]. Yleissuunnitelman valmistumisen jälkeen monet lähtökohdat kuitenkin muuttuivat ja TALLI-malli kehittyi myös, joten myöhemmin vaikutusten arvioinnin yhteydessä laadittiin uudet ennusteet vuosille 2025 ja 2040. [52]

Mallin maankäyttövaihtoehto pohjautuu Pirkanmaan maakuntakaavan Aurinko 2 -vaihtoehtoon (Kuva 21) [22]. Vaihtoehto on maakuntakaavan vaihtoehtoista urbaanein. Aluekehityksen painopiste on kunta- ja alakeskuksissa. Tampereen ydinkeskusta tiivistyy voimakkaasti ja uudet alakeskukset muodostuvat Lakalaivaan ja Sääksjärvelle. Järjestelyratapiha siirretään uuteen paikkaan ja Tampereen eteläpuolelle perustetaan uusi rautatieasema. [43]



| Asumisen painopistealueet ydinkaupunkiseudulla | |
|--|--|
| 1. Tampere / Keskusta – Sammonkatu – Järjestelyratapiha – Nekala | |
| 2. Tampere / Vuores | |
| 3. Tampere ja Kangasala / Ojala-Lamminrahka | |
| 4. Tampere / Hervanta | |
| 5. Tampere / Lakalaiva – Lahdesjärvi | |
| 6. Tampere / Tesoma | |
| 7. Tampere / Lielähti – Santalahti | |
| 8. Tampere ja Kangasala / Annala – Saarenmaa | |
| 9. Tampere ja Pirkkala / Pirkkalan keskusta – Naistenmatkantie – Härmälänranta | |
| 11. Tampere / Hankkio | |
| 12. Tampere / Niihama | |
| 14. Kangasala / Keskusta ja nauhataajama | |
| 15. Kangasala / Pikonlinna | |
| 17. Lempäälä / Keskusta – Hakkari | |
| 18. Lempäälä / Sääksjärvi | |
| 19. Lempäälä / Kulju | |
| 21. Nokia / Keskusta | |
| 22. Nokia / Harjuniitty | |
| 23. Nokia / Taivalkunta – Sammalisto | |
| 25. Ylöjärvi / Keskusta – Mäkkylä-Teivaala | |
| 26. Ylöjärvi / Siltatie (Kirkonseutu) | |
| 27. Ylöjärvi / Metsäkylä | |

| | |
|---|---|
| ■ | Rautatieasema |
| — | Rautatie |
| — | Tieverkko |
| ✈ | Lentoasema |
| ■ | Asemakaavoitettu alue |
| ■ | Asemakaavoittamaton taajama |
| ■ | Vihervetko |
| ■ | Vesistö |
| ■ | Valtakunnanosakeskus / maakuntakeskus |
| ■ | Joukkoliikenteen laatukäytävä |
| ■ | Hyvä maakunnallinen bussiyhteys |
| ■ | Ydinkaupunkiseudun kunta- tai alakeskus |
| ■ | Järjestelyratapiha |
| ■ | Uusi / merkittävästi täydennettävä asuialue |
| ■ | Uusi / merkittävästi kehitettävä työpaikka-alue |
| → | Raideliikenteen yhteystarve |
| → | Tieliikenteen yhteystarve |
| ■ | Kehän suuntainen joukkoliikennenyhteys |
| ○ | Uusi raideliikenteen asema / seisake |

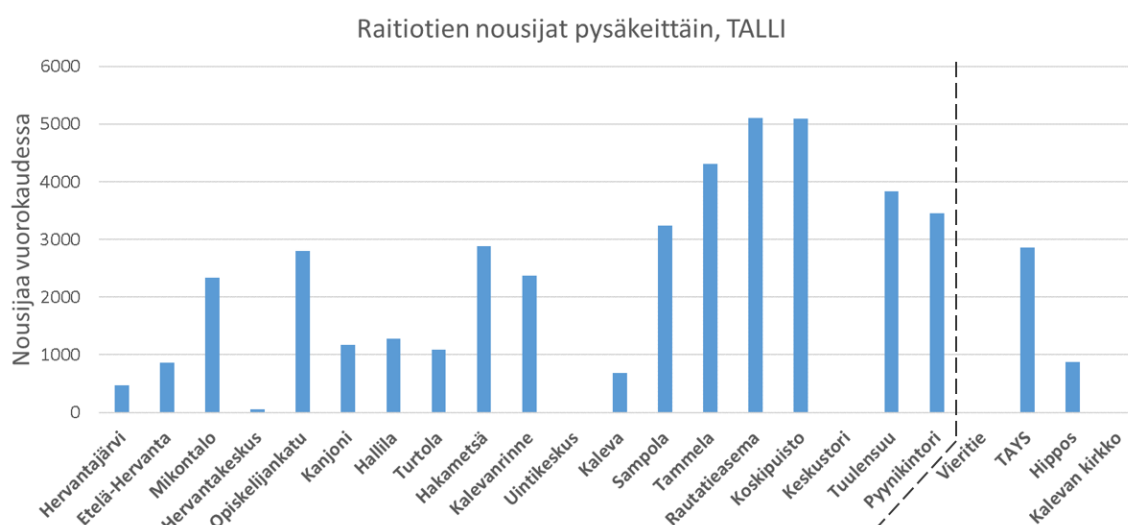
Kuva 21 TALLI-mallin maankäyttöennuste perustuu Aurinko 2 -vaihtoehtoon, jossa maankäyttö keskittyy kunta- ja alakeskuksiin. [43]

Kaupunki on päivittänyt maakuntakaavan maankäyttöennustetta. Matkustajamääräennusteissa päädyttiin käyttämään maankäyttöennustetta, jossa on mukana myös Hiedanrannan optio. Tällöin raitiotien vaikutusalueella eli korkeintaan 800 metrin päässä pysäkiltä asui 116 000 asukasta vuonna 2025 ja 172 000 vuonna 2040. Asuntotuotannosta 75 % odotetaan sijoittuvan vaikutusalueelle. [52]

Eero Kauppinen laati kesän ja syksyn 2018 aikana konsulttityön yhteydessä nousijamääräennusteen raitiotien 1. ja 2. vaiheelle. Ennuste huomioi uudet asukkaat raitiotien maankäytöllisellä vaikutusalueella eli 600 metrin kävelyetäisyydellä pysäkestä. Heidän tuottamansa kysyntä lisätään nykyisiin nousijamääriin, jotka on määritetty raitiotiepysäkkien lähellä sijaitsevien nykyisten bussipysäkkien nousijamääristä. Ennusteissa ei ole otettu huomioon muuta liityntää kuin kävely, eikä muita joukkoliikenteen käyttöön vaikuttavia sosioekonomisia tekijöitä, kuten pysäköintimaksujen suuruutta. Ennusteille voidaan kuitenkin huomioida raidekerroin, jolla voidaan huomioida muita ominaisuuksia. Ennuste laadittiin kolmelle skenaariolle: minimi-, keski- ja maksimiskenaario. Skenaarioissa oletettiin alueelle muuttavien uusien asukkaiden käyttävän raitiotietä 10–20 %:lla matkoistaan ja matkaluvuksi oletettiin 3,1 tai 3,2. [27] Malliin viitataan jatkossa termillä ”Kauppisen malli”.

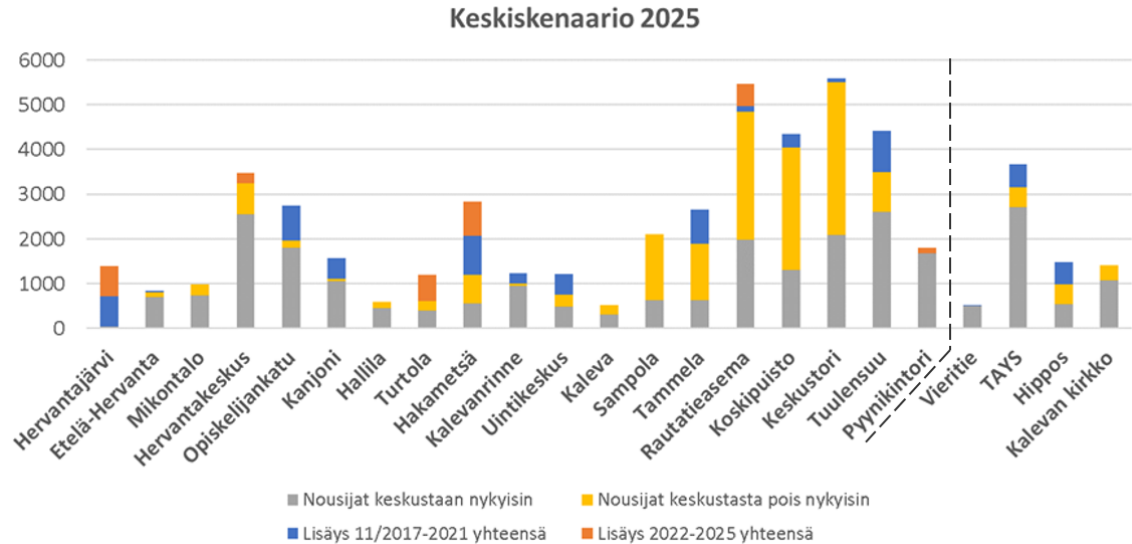
4.3 Ennusteiden vertailu

TALLI-mallin ja Kauppisen mallin arvioimiseksi niiden tuottamia ennusteita verrattiin toisiinsa. Tarkastelussa olivat mukana vain raitiotien ensimmäisen vaiheen pysäkit, koska toisen vaiheen ennusteet on tehty malleilla eri linjauksille, eivätkä siten ole vertailukelpoisia. TALLI-mallista myös puuttuu Uimakeskuksen ja Kalevan kirkon pysäkit. Molemmat ennusteet on laadittu vuodelle 2025 ja kuvaavat keskiarkivuorokauden nousijamääriä. Alla (Kuva 22) on TALLI-mallin nousijamääräennuste raitiotielle pysäkeittäin.



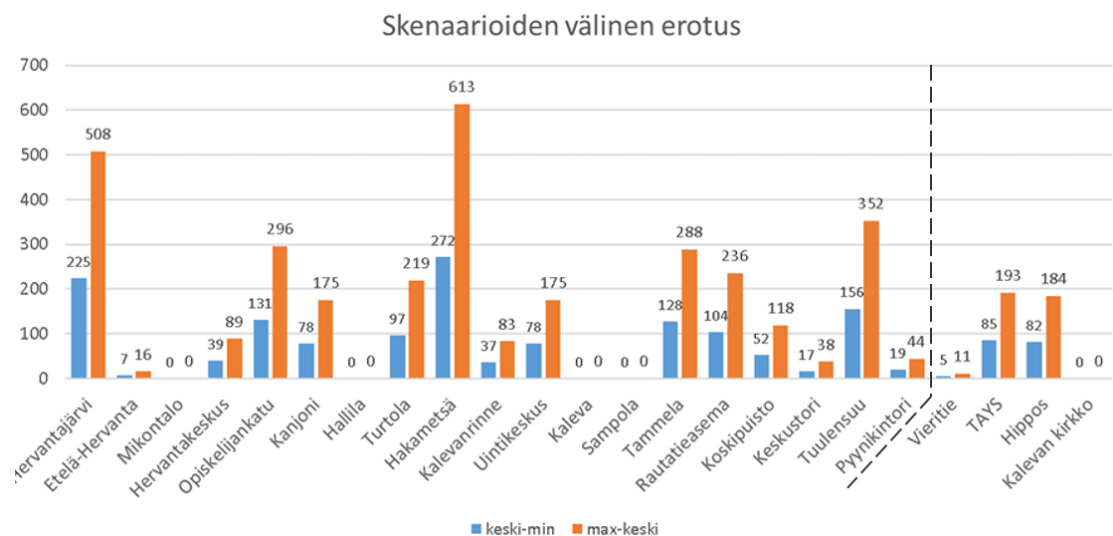
Kuva 22 Raitiotien nousijat vuorokaudessa pysäkeittäin TALLI-mallin mukaan. TAYS:n haara erotettu katkoviivalla.

Kauppisen mallin keskiskenaariossa oletettiin, että raitiotien maankäytölliselle vaikutus-alueelle muuttavat käyttävät 15 %:lla matkoistaan raitiotietä. Matkaluvuksi oletettiin 3,1 matkaa henkilöä kohden vuorokaudessa. Näin laskettu nousujen lukumäärä lisättiin nykytilan nousijamäärään. [27] Keskiskenaarion tulokset on esitetty alla (Kuva 23).



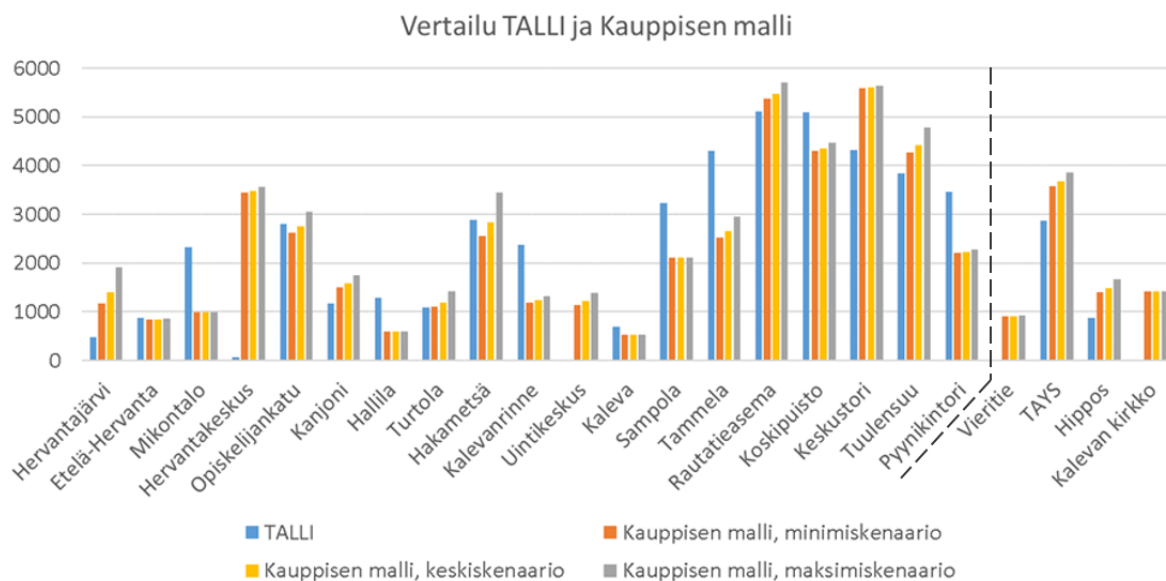
Kuva 23 Kauppisen mallissa nykyisten bussilinjojen nousijamäärään on lisätty uusista asunnoista syntyvä matkustuskysyntä. [27]

Kauppisen malliin tehtiin herkkyystarkasteluina myös minimi- ja maksimiskenaariot. Minimiskenaariossa vain 10 % uusien asukkaiden tekemistä matkoista tehdään raitiotiellä. Maksimiskenaariossa raitiotiellä tehdään 20 % matkoista ja matkaluvun on oletettu olevan 3,2. [27] Skenaarioiden välinen ero on merkittävä erityisesti Hervantajärven, Opiskelijankadun, Hakametsän ja Tuulensuun pysäkeillä. Skenaarioiden ennusteiden erotus on kuvattu alla (Kuva 24).



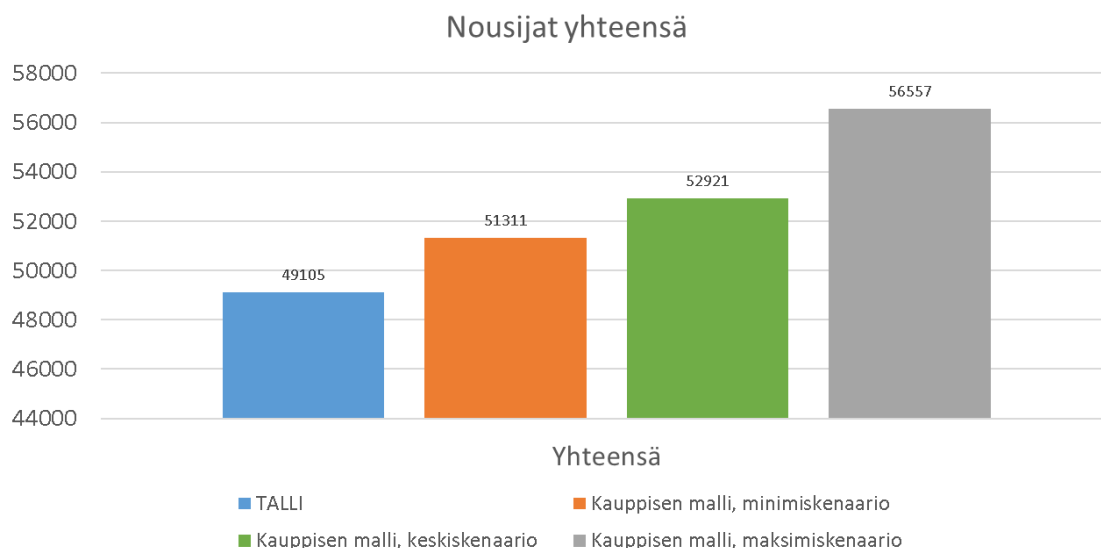
Kuva 24 Kauppisen mallin keskiskenaarion ja minimiskenaarion matkustajamäärien erotus sekä maksimiskenaarion ja keskiskenaarion matkustajamäärien erotus.

Eri skenaarioiden vertailu TALLI-mallin ennusteeseen on esitetty alla (Kuva 25). TALLI ennustaa merkittävästi enemmän matkustajia Mikontalon, Hallilan, Kalevanrinteen, Sampolan, Tammelan ja Pyynikintorin pysäkeille kuin Kauppisen malli. Kalevanrinteen ero selittyy osittain sillä, että TALLI-mallissa ei ole Uintikeskuksen pysäkkiä, joten suuri osa sen kysynnästä tulee todennäköisesti Kalevanrinteen pysäkille. Selkein virhe TALLI-mallissa on Hervantakeskuksen nousijamäärä, jonka malli on aliarvioinut reilusti. Hervantakeskuksella on nykyisin yli 3000 nousua vuorokaudessa [27]. Lisäksi TALLI ennustaa huomattavasti vähemmän matkustajia TAYS:n linjalle.



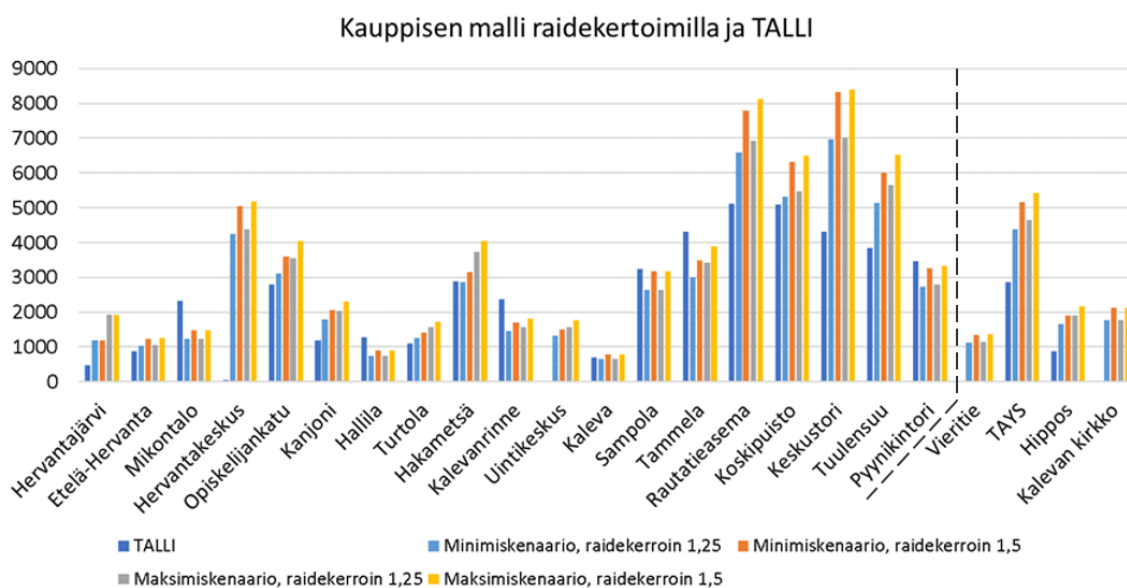
Kuva 25 Joillekin pysäkeille TALLI ennustaa suurempaa kysyntää kuin Kauppisen malli, kun taas joillekin pysäkeille kysyntää ei synny lainkaan.

Koko raitiotieverkolla TALLI ennustaa noin 2 000–7 500 nousua vähemmän kuin Kauppisen malli. TALLI-mallin nykytilan ennuste oli noin 9 % todellisuutta pienempi. Jos virhe on yhtä suuri myös ennusteissa, on TALLI-mallin ennuste yhtä suuri Kauppisen mallin keskiskenaarion kanssa eli noin 53 000 matkustajaa vuorokaudessa. Kaikkien pysäkkien nousijoiden summa on esitetty seuraavalla sivulla (Kuva 26).



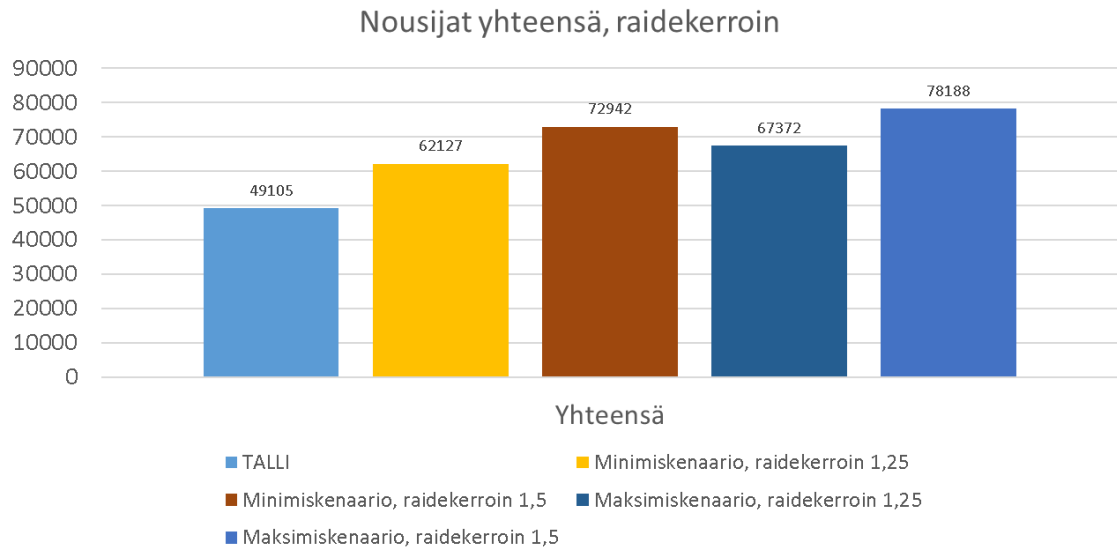
Kuva 26 TALLI-malli ennustaa vähemmän matkustajia raitiotielle kuin Kauppisen malli.

Toisin kuin TALLI-mallissa, Kauppisen mallin tuloksissa ei ole otettu huomioon raidekerrointa nykyisille asukkaille. Raidekerroin voi olla jopa 1,3–1,5 [30]. Alla on esitetty tulokset Kauppisen mallin ennusteille, joissa on huomioitu raidekertoimet 1,25 ja 1,5 nykyisille asukkaille (Kuva 27 ja Kuva 28).



Kuva 27 Kun Kauppisen mallin ennusteissa huomioidaan raidekerroin, ennustaa se TALLI-mallia enemmän matkustajia melkein kaikille pysäkeille.

Raidekerroin lisää Kauppisen ennusteen kysyntää huomattavasti ja TALLI-mallin ennuste on suurempi enää neljällä pysäkillä. Vielä selkeämmin ero näkyy kokonaismatkustajamäärässä (Kuva 28). Ero ennusteissa on noin 13 000 – 30 000 nousijaa vuorokaudessa.



Kuva 28 Raidekerroin tekee eron TALLI-mallin ja Kauppisen mallin välillä merkittäväksi.

5. MATKUSTAJAMÄÄRIEN ENNUSTAMINEN PYSÄKKITASOLLA

5.1 Menetelmä

Kirjallisuusselvityksen perusteella päädyttiin testaamaan maantieteellisesti painotettua regressiomallia joukkoliikenteen nousijamäärien ennustamiseen pysäkkitasolla Tampereella. Tavoitteena oli laatia ennuste Linjasto2021 -vaihtoehtoille ja arvioida niiden pohjalta mallin soveltuvuutta matkustajamäärien ennustamiseen. Lähtötietoina käytettiin pääosin Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämiä Yhdyskuntarakenteen seurannan (YKR) -aineistoja [51] ja Tampereen kaupungin avointa paikkatietoaineistoa.

Paikkatietoaineistojen käsittelyssä käytettiin ESRI:n ArcMap (versio 10.5.1) ja avoimen lähdekoodin QGIS (versio 2.18.14) paikkatieto-ohjelmistoja. Menetelmä oli kaksivaiheinen. Ensin määritettiin merkitsevät selittävät muuttujat. Tämä tehtiin ArcMapin Exploratory Regression- ja OLS-työkaluilla. Sitten voitiin estimoida GWR-malli avoimen lähdekoodin GWR4-ohjelmistolla [41].

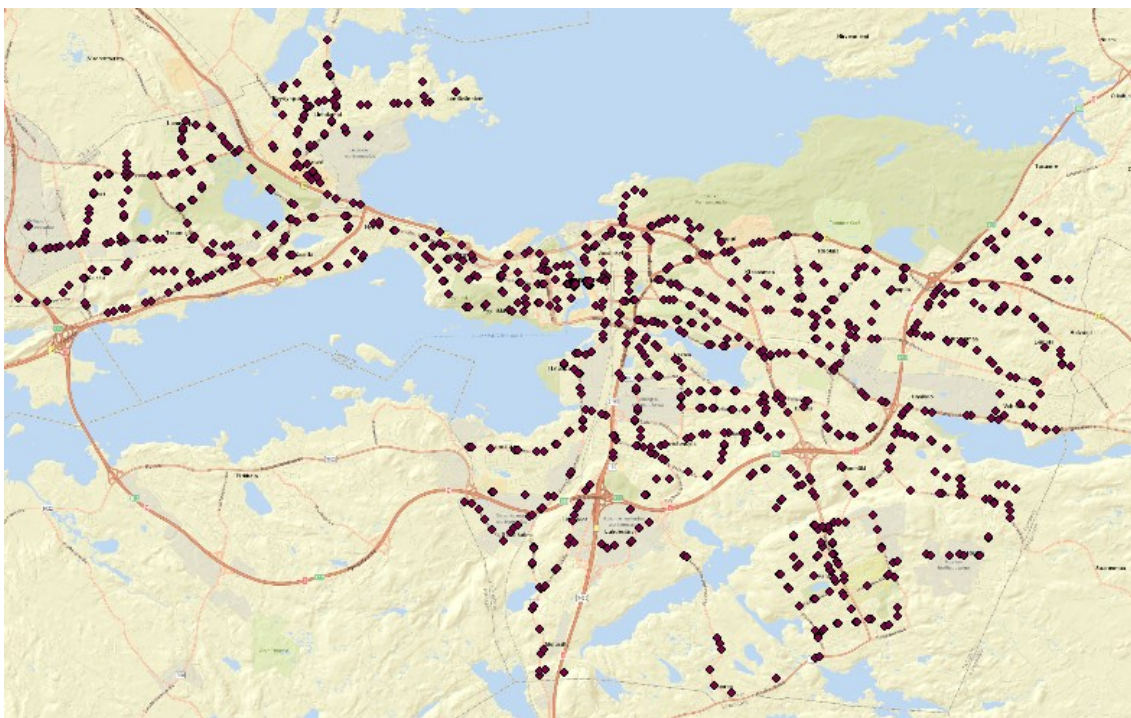
5.2 Lähtötiedot

Ennusteen tuottaminen alkoi lähtötietojen keräämisellä ja muokkaamisella. Pysäkkien tiedot saatiin Liikenneviraston ylläpitämästä Digiroadin pysäkkiaineistosta [33]. Nykytilan nousijamäärät perustuvat Tampereen kaupungin nousijatilastoihin. Mallin estimoinnissa käytettiin viikon 45 keskiarvoisia arkivuorokauden nousijamääriä vuodelta 2017. Teisko rajattiin tarkastelualueen (Kuva 29) ulkopuolelle, koska alueen joukkoliikennekysyntä eroaa merkittävästi muun kaupungin kysynnästä. Rajausta tehtiin Atalan pohjoispuolelta.

Saatavilla olevasta paikkatietoaineistosta kerättiin soveltuvat maankäyttö-, sosioekonomiset ja liikenneverkon tiedot, joilla oletettiin olevan vaikutusta joukkoliikenteen kysyntään. Suuri osa tiedoista on YKR-aineistoja, jotka on kuvattu 250 m x 250 m ruuduille. Jotta pysäkkien vaikutusalueella oleva osuus voitiin laskea, niiden ympärille muodostettiin 400 ja 600 metrin vyöhykkeet. Lisäksi määritettiin 600 metrin vyöhyke todellisen kävelyetäisyyden perusteella. Vaikutusalueella oleva osuus laskettiin suoraan pinta-alojen suhteesta:

$$X = \frac{A_b}{A_{kok}} * X_0, \quad (28)$$

missä X on pysäkin vaikutusalueella oleva data, A_b on vyöhykkeen sisällä olevan osuuden pinta-ala, A_{kok} on koko ruudun pinta-ala ja X_0 on YKR-ruudun data.



Kuva 29 Teiskon alue rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Kartan pisteet kuvaavat tarkasteltavia bussipysäkkejä.

Ajoajat määritettiin ArcMapin Network Analyst -laajennuksen avulla. Verkkona käytettiin autoliikenteelle Digiroadin nykytilan tieverkkoa ja joukkoliikenteelle kunkin vaihtoehdon joukkoliikennelinjastoa. Aika perustuu autoilla nopeusrajoitukseen ja joukkoliikenteellä linjan keskinopeuteen. Joukkoliikenteelle ei ole huomioitu nousu- tai vaihtovastuksia eikä kävelyaikaa pysäkillä. Joukkoliikenteen ajoaika kuvaakin lähinnä saavutettavuutta eikä todellisia matka-aikoja. Autoille on nopeusrajoituksen lisäksi huomioitu alla olevan taulukon (Taulukko 4) mukaiset kääntymisvastukset. Vastukset kuvaavat liittymiin hidastamista ja pysähtymistä. Vastuksina on käytetty samoja arvoja kuin Määttä-Juntusen et. al. [37] tutkimuksessa. Seuraavalla sivulla (Taulukko 5) on esitetty tarkasteleluissa huomioitua lähtötiedot.

Taulukko 4 Kääntymiselle määritettiin vastus, jotta verkko kuvaa paremmin todellista matka-aikaa. [37]

| Käännös | Kääntymiskulma | Kääntymisvastus |
|------------|----------------|-----------------|
| Suoraan | 330°–30° | 6 s |
| U-käännös | 150°–210° | 30 s |
| Oikealle | 30°–150° | 12 s |
| Vasemmalle | 210°–330° | 24 s |

Taulukko 5 Mallinnuksen lähtötiedot

| Lähtötieto | Lähde | Vuosi | Kuvaus |
|-------------------------|------------------------------|-------------|---|
| Asukkaat | YKR | 2017 | 400 ja 600 metrin vyöhykkeillä pysäkin ympärillä asuvien henkilöiden lukumäärä. Miehet, naiset, yhteensä |
| Työpaikat | YKR | 2015 | 400 ja 600 metrin vyöhykkeillä pysäkin ympärillä olevien työpaikkojen lukumäärä |
| Asuinkunnat | YKR | 2015 | 400 ja 600 metrin vyöhykkeillä pysäkin ympärillä asuvien asuinkuntien koko (1, 2, ≥ 3), alle 18-vuotiaiden lukumäärä ja autonomistus (1, ≥ 2) |
| Kaupat | YKR | 2015 | 400 ja 600 metrin vyöhykkeillä pysäkin ympärillä olevien kauppojen lukumäärä. Yhteensä, supermarketit, valintamyymälät, tavaratalot, erikoisliikkeet |
| Koulut | Tampereen kaupunki | 2018 | Koulut 600 metrin säteellä pysäkistä |
| Nousijat | Tampereen kaupunki | 2017 | Toteutuneet joukkoliikenteen nousijamäärät pysäkeittäin syksyllä 2017 |
| Linjojen lukumäärä | Tampereen kaupunki | 2017 | Pysäkin kautta kulkevien linjojen lukumäärä |
| Pysäkit | Digiroad, Tampereen kaupunki | 2017 / 2021 | Pysäkit vuosina 2017 ja 2021 |
| Bussilinjat | Tampereen kaupunki | 2017 / 2021 | Bussilinjat vuonna 2017 ja Linjasto2021-vaihtoehtot. |
| TOAS | TOAS | 2018 | Tampereen opiskelija-asuntosäätiön omistamat talot 600 metrin säteellä pysäkiltä. |
| Etäisyys keskustaan | | | Määritetty linnuntietä ja tieverkkoa pitkin |
| Ajoaika keskustaan | | | Ajoaika pysäkiltä keskustaan autolla ja joukkoliikenteellä sekunneissa. |
| Ajoaika alakeskuksiin | | | Ajoaika pysäkiltä lähimpään alakeskukseen autolla ja joukkoliikenteellä sekunneissa. Alakeskukset: Hervanta, Lielähti, Tesoma, Koilliskeskus, Härmälä |
| Ajoaika korkeakouluihin | | | Ajoaika pysäkiltä lähimmälle korkeakoulun kampukselle joukkoliikenteellä. |

5.3 Muuttujien valinta

Optimaalisen GWR-mallin löytämiseksi määritettiin ensin sopivat selittävät muuttuja lineaarisen regressiomallin avulla. Testaaminen tehtiin ArcMap ohjelmiston Exploratory regression- ja OLS-työkaluilla. Selitettävänä muuttujana käytettiin nousijoiden lukumäärää.

Vaihtoehtoja selittäväksi muuttujaksi valikoitui lopulta yli 50. Näitä testattiin Exploratory regression -työkalulla, joka suorittaa lineaarisen regressioestimoinnin kaikille mahdollisille muuttujayhdistelmille ja suorittaa niille luvussa 3.6 kuvatut tarkastukset. Tuloksena työkalu antoi parhaiten suoriutuneet muuttujayhdistelmät, joille tehtiin vielä Ordinary least squares -työkalulla uusi estimointi, jotta voitiin tarkastella tulosten hajontaa ja arvioida, onko tarvetta uusille muuttujille.

Näin saatiin määritettyä optimaalinen malli käytössä olevilla lähtötiedoilla. Malli oli muotoa:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * \text{linjatLKM} + \beta_2 * \text{KAUPAT400} + \beta_3 * \text{sqrt}(\text{ASUKKAAT400}) + \beta_4 * \text{katos} + \beta_5 * \text{keskustori} + \beta_6 * \text{koskipuisto},$$

missä linjatLKM on pysäkin kautta kulkevien linjojen lukumäärä, KAUPAT400 400 metrin säteellä olevien kauppojen lukumäärä, katos binäärimuuttuja, joka saa arvon 1 jos pysäkillä on katos ja keskustori sekä koskipuisto binäärimuuttujia, jotka saavat arvon 1 jos pysäkki on keskustorilla tai koskipuistossa. OLS- ja GWR-mallin tulokset valituilla muuttujilla on esitetty alla (Taulukko 6).

Taulukko 6 Muuttujayhdistelmällä saatiin korkeat R^2 -arvot malleille.

| OLS | GWR | | | | | |
|--------------------|-------------------------|-------------|-------------------|-------------|------------|------------|
| | Muuttujat | Kerroin | Lokaalit | min. | max. | Keskisarvo |
| | Intercept | -132.016462 | | -442.191312 | 10.561611 | -73.157478 |
| | LinjatLKM | 48.771243 | | -5.462122 | 198.291654 | 44.21974 |
| | | | Globaalit Kerroin | | | |
| | KAUPAT400 | 1.811272 | | 0.88478 | | |
| | sqrt(ASUKKAAT400) | 1.967391 | | 0.872402 | | |
| | katos | 78.093075 | | 74.658682 | | |
| | keskustori | 439.907838 | | 517.639382 | | |
| | koskipuisto | 737.787646 | | 374.346491 | | |
| Tunnusluvut | | | | | | |
| | R^2 | 0.570108 | | | | 0.72148 |
| | AICc | 13982.44709 | | | | 13578.432 |
| | Virhetermien neliösumma | 38609978.99 | | | | 22459359.4 |

Muuttujien tarkempi arviointi kuitenkin osoitti, että ne ovat osittain itseään selittäviä. Tampereen kaupunki asentaa pysäkille katoksen vain, jos tietty matkustajamäärä ylittyy.

Katos siis korreloi matkustajamäärää, mutta katoksen asentaminen ei itsessään todistettavasti lisää matkustajamäärää, joten muuttujaa ei voida käyttää ennustamisessa. Korkea selitysaste ei siis ole tae muuttujien välisestä kausaliteetista.

Myös linjojen lukumäärä todettiin ennustamisen kannalta ongelmalliseksi muuttujaksi. Linjojen lukumäärä ei kuvaa kapasiteettia tai vuoroväliä, joten jos pysäkin kautta kulkee vain yksi linja, mutta se kulkee tiheällä vuorovälillä, ennustaa malli sille liian pientä kysyntää. Vastaavasti jos pysäkin kautta kulkisi viisi linjaa, jokainen kerran päivässä, malli antaisi kyseiselle pysäkillä liikaa matkustajia. Tämä aiheutti ongelmia erityisesti raitiotien ennusteisiin.

Näiden johtopäätösten perusteella päädyttiin karsimaan osa muuttujista pois vaihtoehtojen listalta. Lisäksi karsittiin muuttujia, jotka eivät edellisissä tarkasteluissa korreloineet nousijoiden määrän kanssa ja määritettiin uusia muuttujia kuvaamaan matka-aikaa joukkoliikenteellä ja autolla. Lopulta vaihtoehtoja muuttujiksi oli 33. Nämä on esitetty liitteessä A.

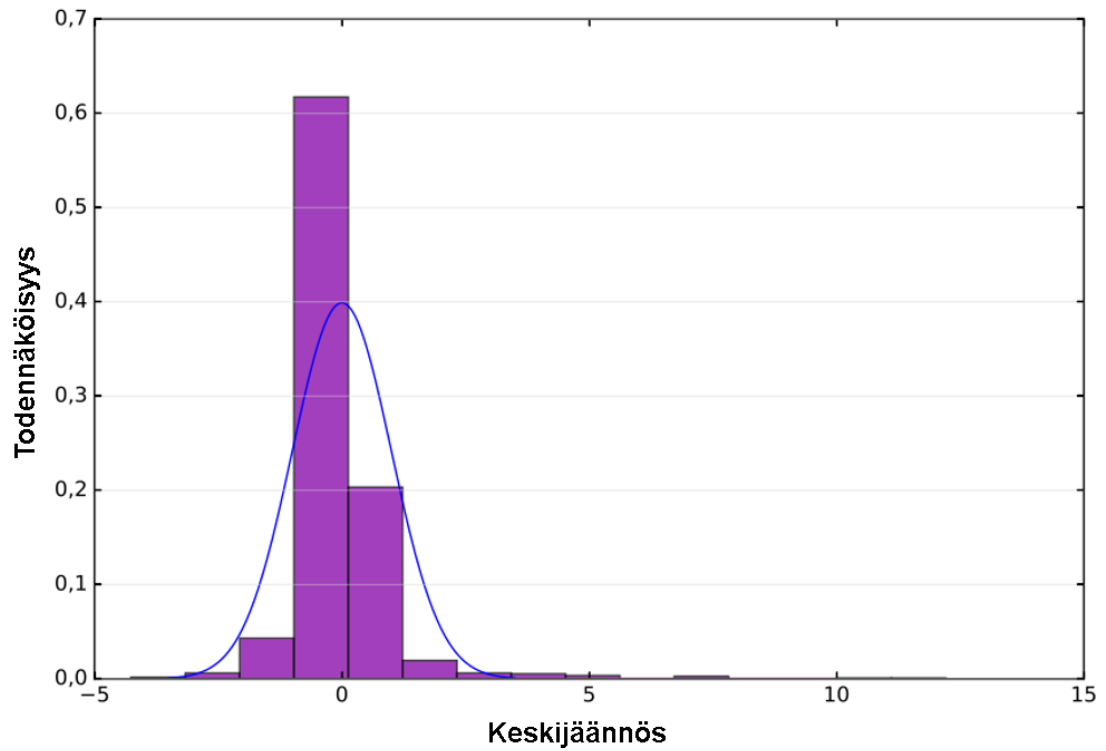
Tarkasteluissa parhaiten suoriutuvaksi OLS-malliksi osoittautui:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * TYÖPAIKAT400 + \beta_2 * VALINTA400 + \beta_3 * keskustori + \beta_4 * koskipuisto + \beta_5 * AS6_{TOD} + \beta_6 * JL_{alakeskus} + \beta_7 * AIKA_UTA,$$

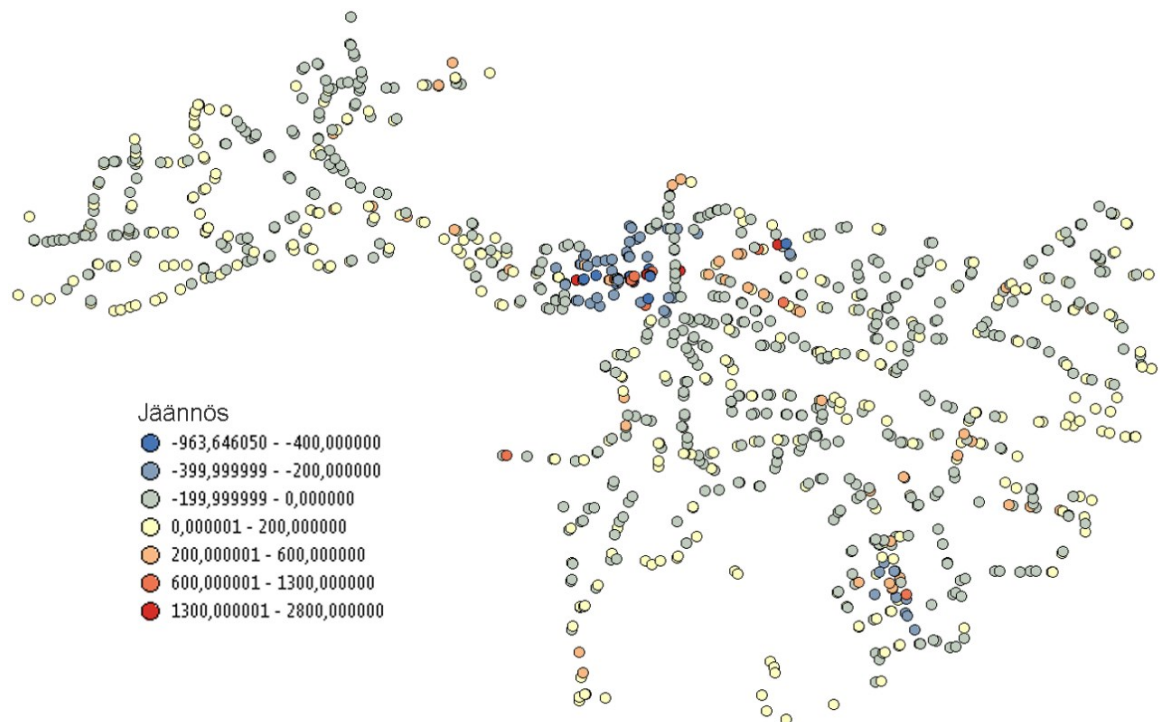
missä TYÖPAIKAT400 on työpaikkojen lukumäärä 400 metrin säteellä pysäkistä, VALINTA400 on valintamyymälöiden lukumäärä 400 metrin säteellä pysäkistä, keskustori ja koskipuisto ovat binäärimuuttujia, jotka saavat arvon 1, kun pysäkki sijaitsee Keskustorilla tai Koskipuistossa, AS6_TOD on asukkaiden lukumäärä 600 metrin etäisyydellä tieverkkoa pitkin, JL_alakeskus on matka-aika pysäkiltä lähimpään alakeskukseen joukkoliikenteellä ja AIKA_UTA on matka-aika pysäkiltä Tampereen yliopiston keskustan kampukselle joukkoliikenteellä.

Mallin R^2 -arvo oli 0,400096. Mallin kuvaavuus laski siis merkittävästi. Lisäksi tuloksiin jäi vinoumaa (Kuva 30). Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että mallista puuttuu jokin selittävä muuttuja, jota ei onnistuttu diplomityön puitteissa löytämään. On myös mahdollista, että kyseinen tekijä on sellainen, jota ei voida malliin kuvata.

Seuraavalla sivulla (Kuva 31) on kuvattu OLS-mallin jäännös pysäkeittäin. Sininen kuvaa liian suurta ennustetta ja punainen liian pientä. Malli näyttäisi toimivan melko hyvin suurimmalla osalla alueita. Jäännös on suurin keskustassa, Kalevassa ja Hervannassa. Keskustorin, Koskipuiston ja rautatieaseman pysäkeillä pysäkkien nousijamäärien summa on melko lähellä todellisia nousijamääriä, mutta se on jakautunut todellisuutta tasaisemmin eri pysäkeille. Joillain pysäkeillä on siis liikaa matkustajia ja toisilla liian vähän.



Kuva 30 Jäännökset eivät ole normaalijakautuneet eli mallissa on vinoumaa.



Kuva 31 Havaintojen ja ennusteen ero on suurin keskustassa, Kalevassa ja Hervanassa. Negatiivinen arvo tarkoittaa, että ennuste on suurempi kuin havainto.

5.4 Maantieteellisesti painotettu regressiomalli

Merkitsevien muuttujien löydyttyä voitiin estimoida GWR-malli. Estimoinnissa käytettiin hyväksi GWR4:n ominaisuutta, jolla osa muuttujista voidaan määrittää paikallisesti ja osa globaalisti, mikä mahdollistaa binäärimuuttujien käytön mallissa. Estimointien yhteydessä huomattiin, että mallin selitysaste parani, kun osa muuttujista vaihdettiin globaaleiksi.

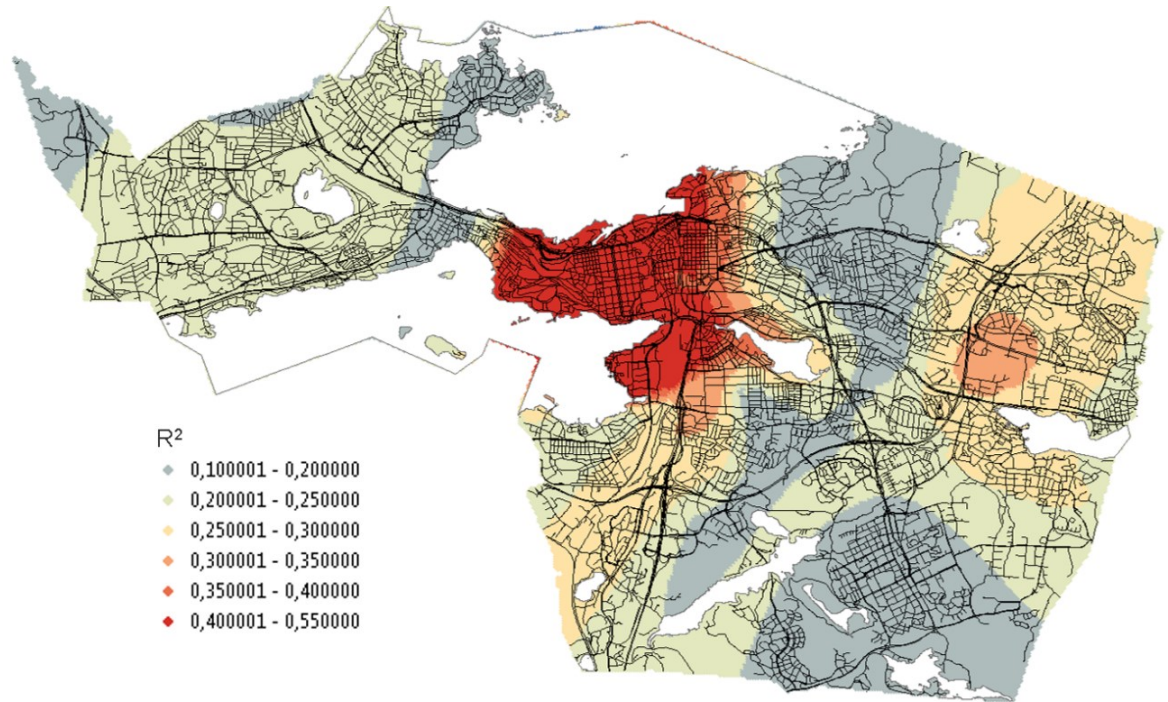
Gloaalien ja lokaalien muuttujien valinta tehtiin käsin maantieteellisen vaihtelun testin perusteella. Tämän voisi tehdä automaattisesti ohjelmistolla, jolloin se testaa kaikkia muuttujia sekä lokaalina että globaalina ja tuloksena on paras malli. Tähän malliajoon menee kuitenkin erittäin kauan ja on nopeampaa valita muuttujat käsin. Ytimenä käytettiin muuttuvaa bi-square funktiota.

Alla (Taulukko 7) on esitetty mallin tulokset. GWR suoriutui hieman globaalia mallia paremmin. Globaaleja muuttujia olivat binäärimuuttujien lisäksi työpaikkojen ja asukkaiden lukumäärä. GWR-mallissa työpaikkojen ja asukkaiden kertoimet ovat hieman suurempia kuin OLS-mallissa ja vastaavasti binäärimuuttujien kertoimet hieman pienempiä. Globaalit kertoimet ovat loogisia, kuten myös lokaalien kertoimien keskiarvot.

Taulukko 7 GWR- ja OLS-mallien kertoimet ja tunnusluvut.

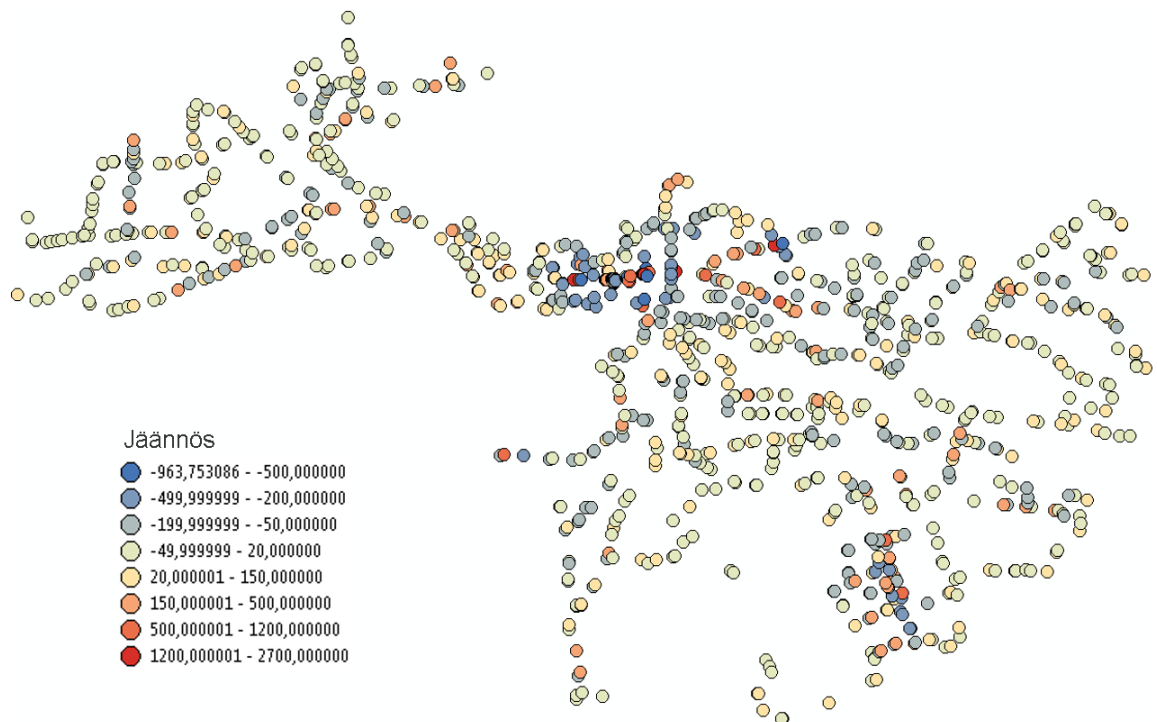
| OLS | | Lokaalit | GWR | | | |
|-------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|--------------|
| Muuttujat | Kerroin | | min. | max. | Keskiarvo | Keskihajonta |
| Intercept | 141.410389 | | -70.886543 | 686.211825 | 176.026165 | 145.658242 |
| VALINTA400 | 39.260136 | | -67.211355 | 136.383417 | 28.691565 | 36.20573 |
| JL_ALAKES | -0.103606 | | -0.920188 | 0.181102 | -0.149051 | 0.223606 |
| AIKA_UTA | -0.059025 | | -0.629172 | 0.168056 | -0.105486 | 0.138405 |
| | | Globaalit | Kerroin | | | |
| TYOPAIKAT4 | 0.030929 | | 0.036874 | | | |
| KESKUSTORI | 535.270758 | | 498.201457 | | | |
| KOSKIPUISTO | 993.477301 | | 895.975146 | | | |
| AS6_TOD | 0.013361 | | 0.028019 | | | |
| Tunnusluvut | | | | | | |
| R^2 | 0.400096 | | | | | 0.4325 |
| AICc | 14177.76409 | | | | | 14147.85629 |

Mallin R²-arvojen tarkastelu paikallisesti (Kuva 32) osoittaa, että lähellä keskustaa kuvaavuus on hyvä ja se heikkenee kauempana keskustasta. Kuvaavuus on hyvä myös lähellä Koilliskeskusta. Heikoimmillaan kuvaavuus on Hervannassa, Lentävänniemessä ja akselilla Kauppi-Ruotula-Hakametsä-Turtola-Nekala-Lahdesjärvi. Pääosin mallin kuvaavuus on kuitenkin melko hyvä, eikä millään alueella ole negatiivisia arvoja.



Kuva 32 Mallin kuvaavuus on parhaimmillaan lähellä keskustaa.

Mallin jäännösarvoissa (Kuva 33) virhettä on erityisesti keskustan, Kalevan ja Hervannan alueilla. Jäännös kuvaa kuitenkin absoluuttista virhettä, joten pienen kysynnän pysäkeillä tulos voi näyttää hyvältä, vaikka suhteellinen virhe on tuhansia prosentteja. Suurin osa tarkastelluista pysäkeistä on pienen kysynnän pysäkkejä, joten suhteellinen virhe kuvaa todellisuutta paremmin.



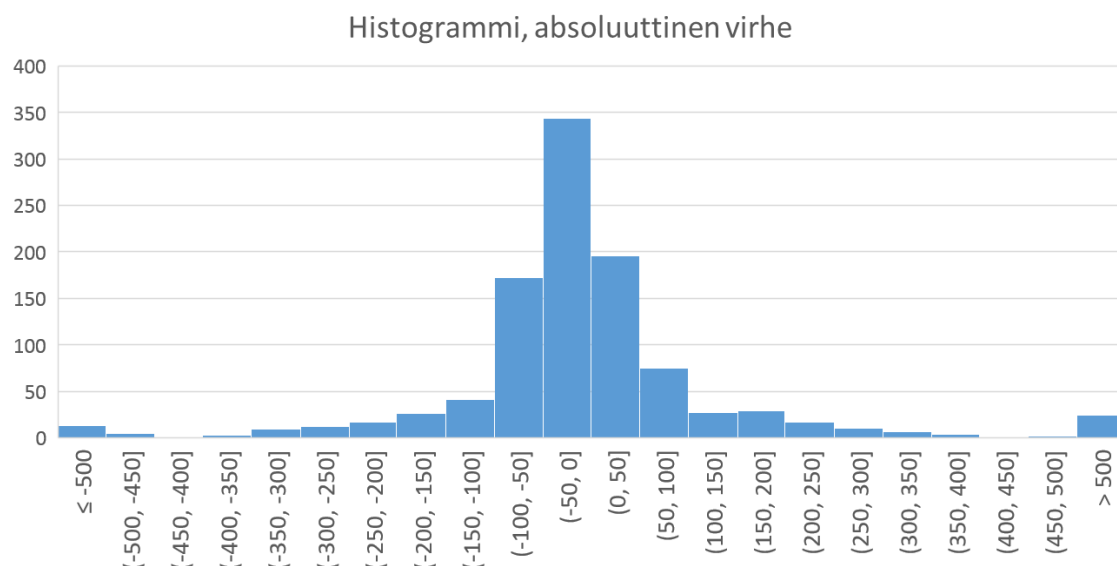
Kuva 33 GWR-mallin jäännös pysäkeittäin

Mallin nykytilan ennuste on erittäin lähellä todellista, kun tarkastellaan kaikkien pysäkkien matkustajamäärien summaa (Taulukko 8). Virhe on alle yhden prosentin. Myös pysäkkitasolla absoluuttiset virheet ovat pieniä. 75 %:ssa tapauksista absoluuttinen virhe on alle 100 matkustajaa, mikä on hyvä tarkkuus. Kuten aiemmin todettiin, se ei kuitenkaan kuvaa mallin toimintaa riittävästi. Kun virhe suhteutetaan pysäkin toteutuneisiin matkustajamääriin, vain noin 30 %:lla pysäkeistä virhe on alle 50 %.

Taulukko 8 Mallin kuvaavuus on heikompi pysäkkitasolla kuin koko kaupungin tasolla.

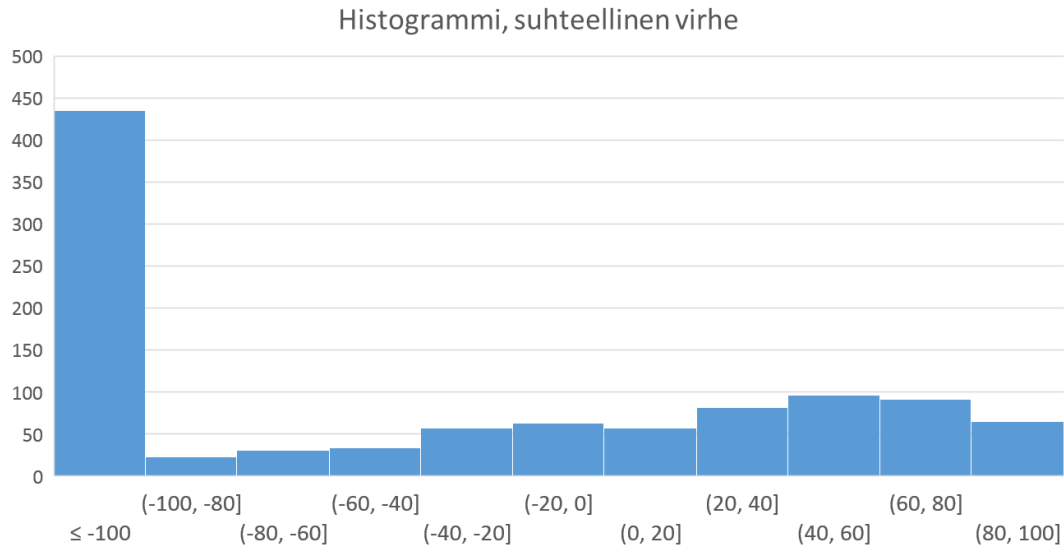
| | Toteuma | GWR |
|----------------------------|---------|--------|
| Nousijat | 132542 | 131652 |
| Virhe | - | 890 |
| Suhteellinen virhe | - | 0,67 % |
| Absoluuttinen virhe | - | 76 % |
| < 100 (pysäkit) | | |
| Suhteellinen virhe | - | 31 % |
| < 50 % (pysäkit) | | |

Mallin virheet kuvattiin histogrammeihin (Kuva 34 ja Kuva 35). Absoluuttiset virheet olivat pääosin pieniä, mutta yli 500 matkustajan virheitäkin oli reilusti. Malli näyttäisi ennustavan pysäkeille todellisuutta tasaisempaa kysyntää eli pienen kysynnän pysäkeille liikaa matkustajia ja suuren kysynnän pysäkeille liian vähän.



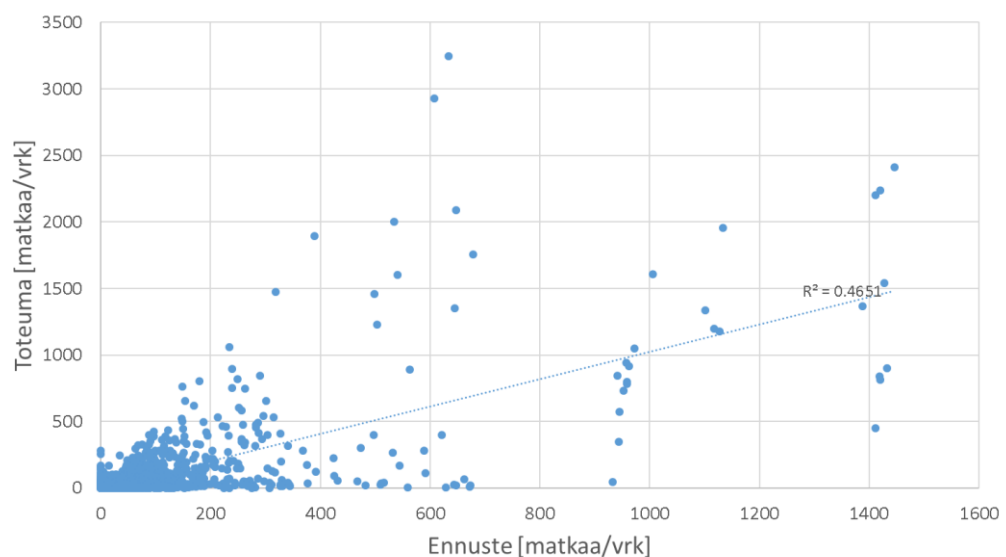
Kuva 34 Toteuman ja ennusteen erotushistogrammi

Selkeimmin mallin epätasapaino näkyy, kun tarkastellaan suhteellista virhettä (Kuva 35). Valtaosalla pysäkeistä mallin ennustaa yli 100 % liikaa matkustajia. Verrattuna TALLI-malliin (Kuva 20) GWR näyttäisi tekevän huomattavasti vähemmän 80–100 %:n aliarviointeja.



Kuva 35 Suhteellinen virhe osoittaa, että malli ei kuvaa pienen kysynnän pysäkkejä kovinkaan hyvin.

Mallin hajontakuvaajaa (Kuva 36) tarkastelemalla voidaan todeta, että mallin pysäkkitason kuvauksessa on puutteita. Tuloksissa on jonkin verran hajontaa ja malli selittää vain 47 % nousijamäärän vaihtelusta. Suurimmat absoluuttiset virheet pysäkeillä Rautatieasema A ja Aleksanterin kirkko. Rautatieasema A:n virhe tasoittuu, kun rautatieaseman pysäkkejä tarkastellaan kokonaisuutena, mutta kokonaisuudessaankin niillä on liian pieni kysyntä. Aleksanterin kirkon pysäkin kysyntää malli ei kuvaa hyvin, koska pysäkin välittömässä läheisyydessä ei ole asutusta. Pysäkillä kävellään kuitenkin kauempaa, koska se on merkittävä joukkoliikenteen solmukohta, jonka kautta kulkee useita linjoja lähes kaikkialle Tampereella. Vaikka GWR-malli kuvaa pysäkkitasolla matkustajamääriä paremmin kuin TALLI-malli, ei pysäkkikohtaisiin tuloksiin voi täysin luottaa.



Kuva 36 Mallin tuloksissa on merkittävää hajontaa, eikä pysäkkitason tuloksiin voi täysin luottaa.

5.5 Ennuste GWR-mallilla

Määritetyllä mallilla laadittiin ennuste erikseen molemmille Linjasto2021-linjastoluonnoksille, jotta nähtiin, miten malli toimii ennusteen laatimisessa. Ennusteen laadintaan ei ollut saatavilla maankäyttöennusteita sopivassa muodossa muualle kuin raitiotien varteen, eikä niitä ollut mahdollista diplomityön puitteissa määrittää. Testauksessa päädyttiin siihen, että ennusteet laadittiin nykytilan maankäytöllä ja raitiotiepysäkeille lisättiin ennusteen mukaiset asukkaat ja työpaikat. Maankäytön ennuste on esitetty alla (Taulukko 9). Kauppinen [27] on määrittänyt tiedot Tampereen kaupungin asemakaavojen perusteella.

***Taulukko 9** Raitiotiepysäkeille lisättiin taulukon mukaiset asukasmäärät ja työpaikat.*

| Pysäkin nimi | Uudet asuk- kaat 2021 | Uudet työpaikat 2021 |
|---------------------|--|-------------------------------------|
| Hakametsä | 1880.20 | 71.77 |
| Hallila | 0.00 | 0.00 |
| Hervantajärvi | 1450.00 | 7.50 |
| Kaleva | 0.00 | 0.00 |
| Kalevanrinne | 474.93 | 228.00 |
| Kanjoni | 1000.00 | 170.63 |
| Mikontalo | 0.00 | 1.13 |
| Opiskelijankatu | 1691.25 | 271.72 |
| Turtola | 0.00 | 0.00 |
| Uintikeskus | 1000.00 | 6.71 |
| Keskustori | 215.00 | 0.00 |
| Koskipuisto | 676.75 | 1144.96 |
| Pyynikintori | 0.00 | 216.08 |
| Rautatieasema | 253.75 | 500.00 |
| Sampola | 0.00 | 0.00 |
| Tammela | 1646.13 | 66.67 |
| Tuulensuu | 2010.87 | 432.55 |
| Hervantakeskus | 6.30 | 0.00 |
| Etelä-Hervanta | 88.88 | 1.85 |
| Hippos | 1052.55 | 55.11 |
| Kalevan kirkko | 0.00 | 52.93 |
| TAYS | 1100.00 | 0.00 |
| Vieritie | 61.95 | 3.87 |

Malli antaa molemmille vaihtoehtoisille uskottavan ennusteen, kun ennustetta verrataan nykytilanteeseen ja TALLI-malliin. Sen sijaan raitiotielle malli ennustaa huomattavan vähän matkustajia. Matkustajamääräennuste koko verkolle ja raitiotielle on esitetty seuraavalla sivulla (Taulukko 10). Raitiotien pysäkkikohtaiset matkustajamääräennusteet on

kuvattu liitteessä B ja esimerkki pysäkkikohtaisista tuloksista liitteessä C. Molemmat ennusteet ovat TALLI-mallin ennustetta pienempiä. GWR-mallissa käytetty maankäyttö on sama kuin nykytilanteessa, joten ennusteissa ei ole huomioitu väestönkasvua tai uusia työpaikkoja. Myös raitiotien liian alhainen kysyntä selittää osaltaan eroa koko verkon kysynnässä. Lisäksi TALLI-mallin ennuste kuvaa vuotta 2025, mikä osaltaan vaikuttaa suurempaan ennusteeseen.

Taulukko 10 Malli ennustaa koko verkon matkustajamääriä luotettavan oloisesti, mutta raitiotielle malli ennustaa liian pienen kysynnän.

| | Koko verkko | Raitiotie |
|---------------------|-------------|-----------|
| TALLI | 193288 | 49105 |
| Vaihtoehto 1 | 148302 | 9917 |
| Vaihtoehto 2 | 173065 | 11695 |

On vaikea arvioida tarkasti, mistä raitiotien kysynnän alhainen ennuste johtuu. Todennäköisesti malli ei kuvaa tarpeeksi hyvin raitiotien parhaita ominaisuuksia eli kapasiteettia, tiheää vuoroväliä, luotettavuutta ja matkustusmukavuutta. Ennusteissa ei ole siis huomioitu minkäänlaista raidekerrointa.

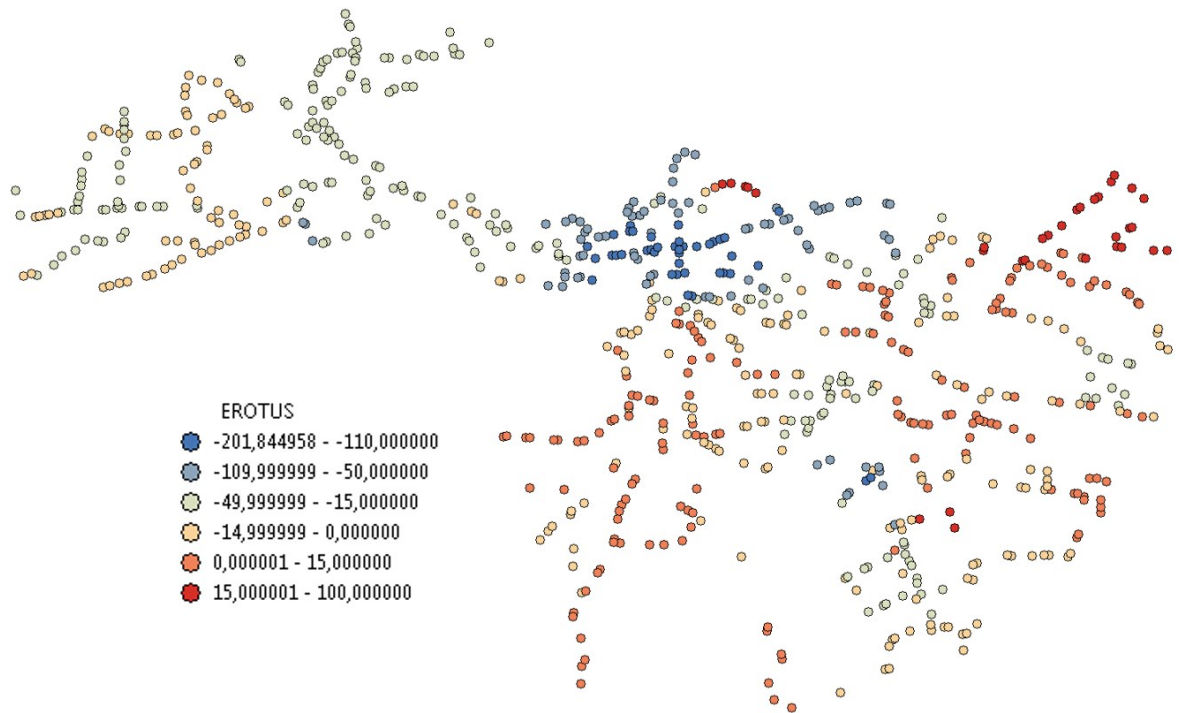
Vaihtoehtojen välisen eron tarkastelemiseksi alla (Taulukko 11) on kuvattu molempien vaihtoehtojen lähtötiedot. Kyseessä on kaikkien pysäkkien summa. Vaihtoehto 1 näyttäisi saavuttavan enemmän asukkaita ja työpaikkoja. Vaihtoehto 2 houkuttelee kuitenkin enemmän matkustajia, koska matka-ajat ovat lyhyempiä. Tämä johtuu verkon suuremmista keskinopeuksista. Keskinopeuksien keskiarvo on vaihtoehdolle 1 26,5 km/h ja vaihtoehdolle 2 28,5 km/h.

Taulukko 11 Linjastovaihtoehtojen muuttujien arvojen summa.

| | ASUKKAAT | TYÖPAIKAT | VALINTA400 | JL_ALAKES | AIKA_UTA |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| VE1 | 2043785.122 | 980799.9838 | 588.2636706 | 491522.6797 | 752358.3848 |
| VE2 | 2023579.974 | 943822.0383 | 572.0171233 | 436365.0467 | 616312.8259 |
| Erotus | 20205.14714 | 36977.94553 | 16.24654736 | 55157.63299 | 136045.5589 |

Tuloksia verrattiin myös pysäkkitasolla. Vaihtoehtojen pysäkeistä 920 voitiin yhdistää tunnuksen avulla. Lopuilla pysäkeillä on eri tunnukset eli ne sijaitsevat eri paikoissa, niitä ei ole jommassakummassa verkossa tai tunnus on muuttunut jostain muusta syystä. 67 %:lla pysäkeistä VE2 ennusti suuremman nousijamäärän ja 14 %:lla VE1. 43 %:lla pysäkeistä ero on kuitenkin alle 10 nousijaa. Kun verrataan nousijamääräennusteita kartalla (Kuva 37), huomataan, että vaihtoehto 1 houkuttelee merkittävästi enemmän matkustajia vain Atalassa. Suurimpia erot ovat keskustan alueella, missä vaihtoehto 2 houkuttelee melkein kaikilla pysäkeillä yli 100 nousijaa enemmän. Ero johtunee erityisesti siitä, että

keskustassa joukkoliikenteen matka-aika alakeskuksiin on merkitsevämpi tekijä, jolloin nopeampi vaihtoehto on suositumpi.



Kuva 37 *Vaihtoehto 2 houkuttelee enemmän nousijoita suurimmalla osalla pysäkeistä.*

Ennusteen perusteella vaihtoehto 2 näyttäisi houkuttelevan enemmän matkustajia. Siihen liittyy kuitenkin merkittäviä epävarmuustekijöitä erityisesti joukkoliikenteen matka-aikojen määrittämisen suhteen. Ennusteissa ei ole huomioitu myöskään maankäytön kehitystä, millä voi olla merkittäviäkin vaikutuksia tuloksiin. Tulokset ovatkin suuntaa antavia ja niiden ensisijainen tarkoitus oli selvittää, voidaanko mallilla laatia luotettavia ennusteita ja minkälaiseen tarkasteluun malli soveltuu.

6. POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Menetelmien soveltuvuus matkustajamäärien ennustamiseen

Työn tavoitteena oli selvittää liikennemallien ja paikkatietoanalyysin soveltuvuutta joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen Tampereella. Työssä tutkittiin erilaisia menetelmiä ennusteiden tekemiseen ja selvitettiin millaisiin tarpeisiin ne vastaavat. Perinteisistä liikennemalleista työssä tarkasteltiin Tampereen seudun TALLI-mallia ja Helsingin seudun Helmet-mallia. Molemmat ovat seudullisia neliporrasmalleja. Ne siis mallintavat liikennettä neljässä vaiheessa: kysyntä, suuntautuminen, kulkutapa ja sijoittelu. Mallit koostuvat useista osamalleista ja ne on estimoitu pääosin matkapäiväkirjatutkimusten perusteella.

Työssä tarkasteltiin erityisesti sellaisia vaihtoehtoisia malleja, joita voidaan käyttää yhdessä paikkatietoanalyysin kanssa tarkasteltaessa pysäkki- ja linjatason matkustajamääriä. Ongelmaan löydettiin kirjallisuusselvityksessä ratkaisuksi erilaiset suorat kysyntämallit. Työssä päädyttiin tarkastelemaan tarkemmin usean muuttujan regressiomalleja, koska ne toimivat hyvin yhteen paikkatietoanalyysin kanssa ja ovat suhteellisen kevyitä toteuttaa. Lisäksi maantieteellisesti painotettu regressio vaikutti menetelmistä edistyksekkäimmältä. Regressiomalleissa selitettävää muuttujaa, esimerkiksi pysäkin nousijamäärää, selitetään funktiolla, joka koostuu kertoimista ja selittävistä muuttujista. Kertoimet estimoidaan siten, että selittävät muuttujat vastaavat mahdollisimman hyvin selitettävää muuttujaa. Tämän jälkeen voidaan tehdä ennusteita muuttamalla selittävien muuttujien arvoja.

Työssä tarkasteltiin kahta eri regressiomallityyppiä: pienimmän neliösumman (OLS) regressiota (kaava 5) ja maantieteellisesti painotettua regressiota (GWR, kaava 21). Mallien ero on se, että OLS-mallissa selittävien muuttujien kertoimet ovat samat koko tarkastelujoukolle. Eri tekijät vaikuttavat kuitenkin eri tavalla joukkoliikenteen kysyntään eri alueilla. GWR-malli huomioi tämän estimoinnissa käytettävillä painotusfunktioilla, joiden perusteella parametrien suuruus vaihtelee alueiden välillä. OLS-mallia tarvitaan selittävien muuttujien valitsemiseen.

Lisäksi työssä tarkasteltiin niin sanottua Kauppisen mallia, jonka Eero Kauppinen kehitti tarkastellakseen Tampereen raitiotien kysyntää ja kapasiteettia pysäkkitasolla. Yksinkertaistettuna malli arvioi pysäkkien ympäristön väestökehityksen perusteella, kuinka paljon pysäkille tulee uusia matkustajia, jos vanhojen asukkaiden joukkoliikennekysyntä oletetaan pysyvän samana kuin nykytilanteessa. Uusien asukkaiden oletettiin käyttävän raitiotietä 10–20 %:lla matkoistaan. Malli ei huomioi muita tekijöitä ja se olettaa, että uusien asukkaiden tuottama kysyntä on yhtä suurta kaikilla pysäkeillä.

Liikennemallit ovat edelleen ainoa tapa mallintaa tulevaisuuden liikennekysyntää. Paikkatietoanalyysillä voidaan tuottaa lähtötietoa liikennemalleille, kuten maankäyttötietoja, aikasarjoja tai saavutettavuustietoa. Loppujen lopuksi nämäkin menetelmät tarvitsevat jonkinlaisen mallin, jonka perusteella vaikutuksia tulevaisuuteen tarkastellaan. Mallin ei kuitenkaan tarvitse olla monimutkainen järjestelmä. Yksinkertaisimmillaan malli on jokin kasvukerroin, jolla nykytilan matkustajamäärät kerrotaan. Paikkatietoanalyysin ja liikennemallien välille onkin turha luoda vastakkainasettelua. Usein unohtuu, että myös liikennemallit ovat paikkatietoanalyysijä ja esimerkiksi sijoitteluohjelmistot voidaan luokitella paikkatieto-ohjelmistoiksi. Alla (Taulukko 12) on kuvattu työssä tarkasteltujen menetelmien ominaisuuksia ja mahdollisia käyttötarkoituksia.

Taulukko 12 Eri mallit soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin.

| | + | – | Käyttötarkoitus |
|------------------------|--|--|--|
| TALLI | + Kulutavan valinnan mallintaminen + Hyvä kuvaavuus karteissa tarkasteluissa + Valmista mallia helppo käyttää + Tuloksia helppo hyödyntää + Pitkän aikavälin ennusteet | - Päivittäminen ja lähtötietojen hankinta hidas ja kallista - Kuvaa huonosti paikallisia olosuhteita ja reagoi hitaasti muutoksiin - Heikko pysäkki- ja linjatason kuvaavuus - Tulosten tulkinta vaatii hyvää tuntemusta mallin toiminnasta | * Suurten hankkeiden tarkastelu * Pitkän aikavälin ennusteet * Strateginen suunnittelu |
| GWR | + Neliporrasmallia parempi kuvaavuus pysäkkitasolla + Suhteellisen kevyt toteuttaa ja päivittää + Lähtötiedot pitkälti olemassa olevaa dataa | - Ei voida mallintaa matkojen suuntautumista - Ei voida estimoida pienelle havaintojoukolle - Lähtötiedot määritettävä jokaiselle pysäkillä erikseen, mikä vaikeuttaa skenaarioiden muokkaamista ja luomista. | * Maankäytön vaikutusten tutkiminen * Joukkoliikennemallin tuotosmalli |
| Kauppisen malli | + Paikallisten olosuhteiden huomiointi + Yksinkertainen ja ymmärrettävä toimintaperiaate + Joustava | - Ei voida tuottaa tarkkoja ennusteita - Kertoimien määrittäminen asiantuntija-arviolla - Jokaisen pysäkin lähtötiedot määritettävä erikseen, rajoittaa tarkastelun laajuutta - Voidaan ennustaa vain matkustajamääriä | * Yksittäisen linjan tai pysäkin kapasiteettitarkastelut |

Suomessa on perinteisesti luotettu neliporrasmalleihin liikenne-ennusteiden laatimisessa. Ne soveltuvat erityisen hyvin seudulliseen tarkasteluun, mutta paikallisiin tarkasteluihin ne ovat usein liian karkeita. Osa-aluejakoa tihentämällä voidaan lisätä mallin tarkkuutta. Tällöin kuitenkin lähtötietojen tarkkuus on yleensä rajoittavana tekijänä. Osa-aluejako vaikeuttaa todellisen pysäkinvalinnan kuvaamista. Neliporrasmallit soveltuvatkin parhaiten suurten liikennehankkeiden tarkasteluun. Niillä voidaan tarkastella hankkeen vaikutusta matkojen suuntautumiseen ja kulkutapajakaumaan. Malleilla pitäisi verrata ensisijaisesti eri skenaarioita toisiinsa, mutta niitä voidaan käyttää myös ennusteiden tuottamiseen. Tällöin ennusteiden tulkitseminen vaatii hyvää tuntemusta mallin toiminnasta ja rajoitteista.

GWR-malli kuvasi nykytilan nousijamääriä Tampereen kantakaupungin alueella tarkasti. Suhteellinen virhe oli alle 1 %. Pysäkkien tarkkuudella malli kuvasi todellisuutta paremmin kuin neliporrasmalli, mutta hajontaa oli silti paljon. Menetelmällä saatiin kuitenkin määritettyä myös hyvin pysäkkitason nousijoita kuvaava malli, joten tarkemmilla lähtötiedoilla laadittu malli voisi kuvata pysäkkitason kysyntää paremmin. Myös kapasiteettia kuvaava muuttuja, esimerkiksi vuoroväli, voisi parantaa mallin kuvausta. Mallin tavoitteena on kuitenkin ennustaa tulevaisuuden kysyntää, joten lähtötietojen tarkkuutta rajoittaa ennustetilanteen lähtötietoaineiston tarkkuus.

GWR-malli voisi soveltua parhaiten eri maankäyttövaihtoehtojen vaikutusten arviointiin. Jos matka-ajat pystytään määrittämään luotettavammin ja totuudenmukaisemmin, mallia voisi käyttää myös linjastomuutosten arvioimiseen. GWR-malli ei kuitenkaan poista uuden liikennevälineen mallintamiseen liittyvää ongelmaa. Malli estimoidaan nykyisen matkustajakysynnän pohjalta, jolloin esimerkiksi uuden raitiotiejärjestelmän kysyntää joudutaan arvioimaan bussien kysynnän pohjalta.

Kauppisen mallilla ei voida tuottaa tarkkaa ennustetta. Se huomioi hyvin mahdollisia muutoksia maankäytössä raitiotiepysäkin lähistöllä ja sillä voidaan tarvittaessa huomioida myös muita paikallisten olosuhteiden muutoksia. Mallissa käytetyt kertoimet perustuvat kuitenkin asiantuntija-arvioon, eikä niillä välttämättä ole tilastotieteellistä perustaa. Tästä syystä mallilla tuotetuille ennusteille tulisi tehdä laajat herkkyystarkastelut. Tuloksena mallista saadaan vaihteluväli mahdolliselle matkustajamäärälle.

Kauppisen mallilla ennustetut matkustajamäärät olivat suurempia kuin TALLI-mallilla tuotetut matkustajamääräennusteet. Kauppisen malli ennustaa raitiotielle 50 000–57 000 matkustajaa vuorokaudessa, kun taas TALLI-malli ennustaa noin 49 000 matkustajaa. Asiaa selittää osaltaan se, että TALLI-mallilla tuotetut ennusteet perustuvat vanhentuneisiin maankäyttöennusteisiin. Lisäksi TALLI-mallista puuttuu joitain raitiotiepysäkkejä ja viimeisimpien linjamuutosten jälkeen ei ole tehty uutta ennustetta. Kun Kauppisen mallissa huomioitiin raidekerroin nykyisille matkustajille, nousi ennuste 62 000–78 000 matkustajaan vuorokaudessa. Kauppisen mallin mukaan on siis riskinä, että TALLI-mallin ennuste ylittyy todellisuudessa merkittävästi.

Yleensä on tarpeen arvioida tapauskohtaisesti, mitä mallilla aiotaan ennustaa ja minkälainen malli soveltuisi tarkoitukseen parhaiten. Neliporrasmalli on edelleen tärkeä työkalu strategisessa suunnittelussa ja pitkän aikavälin ennusteissa. Liian usein sitä kuitenkin käytetään yksityiskohtaisten ennusteiden tuottamiseen. Neliporrasmallin rinnalla olisikin hyvä olla muita menetelmiä paikallisiin tarkasteluihin. Mitä kauemmas tulevaisuuteen ennuste laaditaan, sitä enemmän lähtötiedoissa on epävarmuuksia. Tällöin karkeampi malli on parempi, koska liian tarkka malli ei tuo lisäarvoa, mutta virheiden riski lisääntyy. Yksinkertaisempien mallien tuloksia on myös helpompi selittää. Regressiomallista voidaan selkeästi esittää kaava, johon ennuste perustuu. Neliporrasmalleissa taas kaikki vaikuttaa kaikkeen ja mallin tulosten selittäminen on huomattavasti vaikeampaa. Mallin käyttötarkoituksesta ja logiikasta riippumatta tärkeintä on kuitenkin, että malleja kehitetään ja päivitetään jatkuvasti.

6.2 Joukkoliikenteen mallintaminen Tampereella

TALLI-mallin maankäyttötietoja ollaan päivittämässä syksyn 2018 aikana. Mallin maankäyttö korjataan toteutuneiden väestö- ja työpaikkatietojen osalta ja tarkennetaan vuosien 2025 ja 2040 ennusteita. Tampere on kasvanut enemmän ja kehyskunnat vähemmän kuin aiemmin on ennustettu. Kaupungistumistrendiä pidetään todennäköisenä myös jatkossa. Lisäksi päivityksen yhteydessä julkaistaan Excel-makroilla koodattu käyttöliittymä. Seuraava suurempi päivitys tehdään näillä näkymin vuosina 2020–2021. [49]

Tampere kasvavana kaupunkiseutuna tarvitsee myös tulevaisuudessa keinon laajojen liikennehankkeiden kokonaisvaltaiseen tarkasteluun. Tähän neliporrasmalli on edelleen paras vaihtoehto. Neliporrasmallia voidaan käyttää suurempien joukkoliikennehankkeiden, kuten uusien raitiotielinjausten ja merkittävien linjastomuutosten mallintamiseen. Sitä ei kuitenkaan tulisi käyttää esimerkiksi yksittäisen bussilinjan matkustajamäärien määrittämiseen. Tämä tulee huomioida myös mallin kehittämisessä. Mallia on turha yrittää kalibroida ennustamaan pysäkki- tai linjatason matkustajia oikein, koska sitä ei ole tarkoitettu siihen. Tärkeämpää on varmistua siitä, että malli kuvaa kulkutavan muutoksia ja suuria liikennevirtoja oikein. TALLI-mallia tulisi kehittää näistä lähtökohdista.

Erityisen tärkeää TALLI-mallin jatkokehityksessä on kiinnittää huomiota jatkuvuuteen. Parhaiten tämä onnistuu laadukkaalla dokumentoinnilla. Mallin uskottavuutta on heikentänyt se, että mallin käyttäjillä ei ole ollut selkeästi tiedossa ennusteiden taustalla olevia lähtöoletuksia ja epävarmuustekijöitä. Lisäksi monta vuotta kestänyt siirtymävaihe on johtanut siihen, että eri malliversioilla tehty ennusteet eivät ole vertailukelpoisia [49]. Parempi dokumentointi vähentää ongelmia myös, jos mallin ylläpitäjää päädytään vaihtamaan tai vastuuhenkilöt siirtyvät muihin tehtäviin. Yhteinen käyttöliittymä parantaa mallilla tehtyjen ennusteiden luotettavuutta, koska verkkomuutosten yhteydessä koko malliprosessin suorittamisesta tulee joustavampaa, eikä tarvitse olla pelkän sijoittelun varassa. Lisäksi tarjontamallien versionhallinta on tärkeää, jotta käytössä oleva perusverkko on kaikille sama.

TALLI-mallin joukkoliikenneverkko on nykyään kuvattu Visumissa. Tutkimuksessa ei löydetty selkeää paremmuuseroa Visumin ja Emmen välillä joukkoliikenteen sijoittelussa. Tällä hetkellä Tampereen teknillinen yliopisto on ainoa taho, jolla on Visum käytössä. Onkin tarpeen selvittää, onko tähän tulossa muutosta. Mikäli konsulteilla ei ole tahtoa investoida uuteen ohjelmistoon, myös joukkoliikenteen tarjontamallin siirtämistä Emmeen kannattaa harkita. Seuraavan mallin yhteydessä voidaan myös arvioida, parantaako suuntautumismallin vaihtaminen gravitaatiomallista logittimalliin luotettavuutta merkittävästi.

On hyvin todennäköistä, että liikkuminen siirtyy tulevaisuudessa enemmän matkaketjuiksi. Tampereella olisikin syytä selvittää mahdollisuutta siirtyä yksittäisten matkojen mallintamisesta matkaketjujen tarkasteluun myös liikennemallissa. Lisäksi malliin olisi tarve lisätä ominaisuuksia, joilla voidaan tarkastella tulevaisuuden tavoitetilanteita, kuten matkojen suuntautumista, jos tavoitteelliset kulkutapajakaumat toteutuvat tai vaikutusta väylien palvelutasoon, jos niiden kapasiteettia ei lisätä nykyisestä [49]. Tällaisia ei tämän työn puitteissa kuitenkaan tullut vastaan.

Neliporrasmallin lisäksi on suositeltavaa käyttää muita menetelmiä tarkempien tarkasteluiden tekemiseen. Menetelmiä voidaan käyttää myös yhteistyössä neliporrasmallin kanssa. Esimerkiksi Kauppisen mallia voidaan käyttää tulevien raitiotielinjausten suunnittelussa pysäkkitason tulosten kalibrointiin. Toisaalta TALLI-mallista voidaan määrittää kasvukertoimia Kauppisen mallille.

GWR-malli vaikuttaa potentiaaliselta työkalulta nousijamäärien ennustamiseen. Yksi vaihtoehto GWR-mallin hyödyntämiseksi on laatia Tampereelle erillinen joukkoliikennemalli, jolla voitaisiin tehdä tarkempia, lyhyen aikavälin ennusteita. Kullekin pysäkille voitaisiin määrittää nousijoiden ja poistujien lukumäärä, josta voitaisiin suuntautumismallin avulla tuottaa OD-matriisi, joka voidaan sijoitella joukkoliikenneverkolle. Näin päästäisiin käsiksi myös linjojen kuormitukseen ja matkustajamääriin. Mallin estimoimiseksi tarvitaan kuitenkin nousijatilastojen lisäksi tieto myös poistujien lukumäärästä.

Laadukkaammilla ja tarkemmin määritetyillä lähtötiedoilla mallin kuvaavuutta voidaan todennäköisesti parantaa. Joukkoliikenteen palvelutason kuvaamisessa on edelleen kehitettävää. Tässä työssä määritetyssä mallissa ei ole mukana joukkoliikenteen kapasiteettia kuvaavaa tekijää, kuten esimerkiksi vuoroväliä. Malli huomioi myös huonosti todellista saavutettavuutta. Matka-ajat tulisikin määrittää totuudenmukaisemmin ja huomioida vaihtovastukset.

6.3 Tutkimuksen arviointi

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään joukkoliikenteen kysyntään vaikuttavia tekijöitä, joukkoliikenteen kysynnän ennustamiseen tarvittavia lähtötietoja, matkustajamäärien en-

nustamisen menetelmiä ja eri menetelmillä tuotettujen ennusteiden ominaisuuksia. Tutkimuksessa keskityttiin joukkoliikenteen kysyntään vaikuttaviin tekijöihin lähinnä teknisestä näkökulmasta, eli etsittiin helposti paikkatietomuodossa esitettäviä tekijöitä ja testattiin niiden vaikutusta nousijamäärään regressioanalyysin avulla. Työssä olisi voitu tarkastella laajemminkin joukkoliikenteen kysyntään vaikuttavia tekijöitä kirjallisuuden ja haastatteluiden avulla. Tästä olisi voitu saada paremmin näkökulmaa regressiomallin muuttujien valintaan. Isommaksi ongelmaksi muodostui kuitenkin tunnistettujen vaikuttavien tekijöiden kuvaaminen paikkatietona kuin niiden tunnistaminen.

Kirjallisuudesta tunnistettiin joitakin soveltuvia menetelmiä neliporrasmallin korvaamiseksi tai täydentämiseksi. Näitä esiteltiin luvussa 3. Työssä keskityttiin erityisesti vaihtoehtoisiin malleihin ja pysäkkitasolla ennustamisen näkökulmaan, mutta siinä olisi voitu miettiä myös mahdollisuuksia TALLI-mallin kehittämiseksi ja tutustua tarkemmin esimerkiksi matkaketjumalleihin.

Eri menetelmillä laadittujen ennusteiden vertailussa oli jonkin verran haasteita. Ennusteet eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska ne on laadittu eri alueille ja eri tarkoitukseen. Erityisesti pysäkkitason vertailua vaikeutti se, ettei malleilla ole yhteistä indeksiä pysäkeille ja nimen perusteella yhdistämisessä käy helposti virheitä. Tähän ongelmaan törmättiin, kun verrattiin TALLI-mallin nykytilan ennustetta toteutuneisiin matkustajamääriin. Tuloksista pystyttiin kuitenkin päättämään, minkälaisia ilmiöitä menetelmät parhaiten kuvaavat. Ennusteiden arvioiminen on vaikeaa, koska ainoa tapa varmistaa niiden onnistuminen luotettavasti on matkustajalaskennat, joita ei voida tehdä ennen vuotta 2021. Niitä voitiin kuitenkin arvioida vertaamalla eri menetelmillä tuotettuja ennusteita keskenään. Näin nähtiin selkeät virheet, kuten GWR-mallin raitiotien ennusteiden tai TALLI-mallin Hervantakeskuksen pysäkin liian pienet nousijamäärät.

Työn päätutkimuskysymys oli: Miten eri menetelmät soveltuvat joukkoliikenteen matkustajamäärien ennustamiseen Tampereella? Tähän kysymykseen vastattiin luvuissa 4 ja 5. Eri menetelmät kuvaavat erilaisia asioita ja mallia rakennettaessa joudutaan aina tekemään kompromisseja. Nämä kompromissit pitää tuntea, jotta osataan valita sopiva menetelmä halutun ilmiön mallintamiseen. Kaikki työssä tunnistetut menetelmät todettiin osaltaan soveltuviksi jonkin ilmiön kuvaamiseen. Tärkeämpi huomio on kuitenkin se, että parhaan lopputuloksen saamiseksi pitää yhdistellä eri menetelmiä.

6.4 Jatkotutkimus

Liikenteen mallintaminen on murroksessa, koska ollaan siirtymässä entistä enemmän tieverkon kapasiteetin riittävyyden arvioinnista kokonaisvaltaiseen liikennejärjestelmän tarkasteluun. Mallien tutkimuksessa ja kehittämisessä on useita tutkimusmahdollisuuksia erityisesti joukkoliikenteen ja matkaketjujen osalta.

TALLI-mallin kehittämisessä on mahdollisuuksia jatkotutkimuksille. Yhdysvalloissa kehitetään useita matkaketju- ja aktiviteettimalleja. Yksi mahdollinen tutkimussuunta olisi

selvittää tällaisten mallien vaatimuksia, käyttötarkoituksia ja toteuttamismahdollisuuksia Suomessa. Toinen mielenkiintoinen tutkimussuunta olisi selvittää ja kehittää induktiivisten ”*backcasting*”-menetelmien, eli tulevaisuusskenaarioiden tarkastelun mahdollistavien työkalujen, mahdollisuuksia liikenteen mallintamisessa.

Mielenkiintoinen tutkimuskohde on myös erilaisten joukkoliikennemallien mahdollisuudet. Tässä työssä tunnistettiin, että GWR-malli voisi soveltua joukkoliikennemallin tuotomalliksi. Mallin rakentaminen vaatii kuitenkin monien ongelmien ratkaisemista, kuten tarvittavan datan kerääminen esimerkiksi matkustajalaskennoilla, suuntautumismallin valinta ja sijoittelun toteuttaminen käytännössä. Lisäksi olisi syytä tutkia esimerkiksi simuloimallien mahdollisuuksia osana joukkoliikennemallin toimintaa.

Tampereen raitiotie on ensimmäinen moderni raitiotie, joka Suomeen valmistuu. Siksi matkustajamäärien ennustaminen on haastavaa. Raitiotien valmistumisen jälkeen seuraavassa liikennetutkimuksessa voidaan määrittää raidekerroin. Tämä helpottaa tulevaisuuden raitiotielinjausten matkustajamäärien arvioimista. Kerrointa ei voida suoraan hyödyntää muiden kaupunkien raitiotiehankkeissa, mutta sitä voidaan käyttää suuntaa antavana arviona.

LÄHTEET

- [1] R. Bivand, Geographically Weighted Regression, verkkosivu, saatavilla (viitattu 25.7.2018): <https://www.rdocumentation.org/packages/spgwr/versions/0.6-32/topics/gwr>.
- [2] S. Blainey, Trip end models of local rail demand in England and Wales, *Journal of Transport Geography*, 2010, pp. 153–165.
- [3] S. Blainey, C. Mulley, Using Geographically Weighted Regression to forecast rail demand in the Sydney Region, *Transport and the new world city: 36th Australasian Transport Research Forum (ATRF)*, 2013, 16 p.
- [4] O.D. Cardozo, J.C. García-Palomares, J. Gutiérrez, Application of geographically weighted regression to the direct forecasting of transit ridership at station-level, *Applied Geography*, 2012, pp. 548–558.
- [5] Y. Chiou, R. Jou, C. Yang, Factors affecting public transportation usage rate: Geographically weighted regression, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, pp. 161–177.
- [6] J. Choi, Y.J. Lee, T. Kim, K. Sohn, An analysis of Metro ridership at the station-to-station level in Seoul, *Transportation*, 2012, pp. 705–722.
- [7] G. Currie, A. Ahern, A. Delbosc, Exploring the drivers of light rail ridership: an empirical route level analysis of selected Australian, North American and European systems, *Transportation*, 2011, pp. 545–560.
- [8] T. Elolähde, M. Holm, M. Keränen, A. Supponen, M. Niinikoski, A. Räikkönen, T. Särkkä, Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän tarjontamallit 2014, HSL:n julkaisuja 22/2016, 2016, 176 s.
- [9] T. Elolähde, A. Rantala, V. Pastinen, H. Lehto, P. Leppänen, S. Tuovinen, H. Pesonen, J. Rinta-Piirto, P. Moilanen, A. Rahiala, M. Keränen, Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän (runkona Helmet 3.0) tekninen raportti, 2018, 29 s.
- [10] T. Elolähde, P. Rätty, V. Pastinen, A. Rantala, H. Pesonen, J. Rinta-Piirto, P. Moilanen, A. Rahiala, Helsingin seudun työssäkäyntialueen liikenne-ennustejärjestelmän kysyntämallit 2014, HSL:n julkaisuja 21/2016, 2016, 166 s.
- [11] ESRI, Geographically Weighted Regression (GWR), Verkkosivu, Saatavissa (viitattu 25.7.2018): <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-statistics-toolbox/geographically-weighted-regression.htm>.

- [12] ESRI, What they don't tell you about regression analysis, Verkkosivu, Saatavissa (viitattu 2.8.2018): <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/what-they-don-t-tell-you-about-regression-analysis.htm>.
- [13] J. Gutiérrez, O.D. Cardozo, J.C. García-Palomares, Transit ridership forecasting at station level: an approach based on distance-decay weighted regression, *Journal of Transport Geography*, 2011, pp. 1081–1092.
- [14] G. Hamöller, johtava liikennesuunnittelija, Ramboll GmbH, Sähköpostihaastattelu 6.-7.9.2018.
- [15] C. Hildebrand, S. Hörtin, A comparative study between Emme and Visum with respect to public transport assignment, Master's thesis, Linköping University, 2014, 101 p.
- [16] J. Holmgren, An analysis of the determinants of local public transport demand focusing the effects of income changes, *European Transport Research Review*, 2013.
- [17] INRO, Emme Prompt Manual, Version 4.3, 2017.
- [18] J. Jerling, liikenneanalytiikko, Göteborgin kaupunki, Sähköpostihaastattelu 12.10.2018.
- [19] Joukkoliikennelaki, L 13.11.2009/869, 2009, Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090869>.
- [20] H. Kalenoja, tekniikan lisensiaatti, erityisasiantuntija, Tieliikenteen Tietokeskus Oy, haastattelu 26.7.2018.
- [21] H. Kalenoja, TALLI 2015 -laskentaprosessi, Julkaisematon ohje, 2014, 2 s.
- [22] H. Kalenoja, Tampereen raitiotien yleissuunnitelma, Liikenne-ennusteet, Työraporttiluonnos 30.5.2014, 2014, 28 s.
- [23] H. Kalenoja, H. Tiikkaja, Tampereen kaupunkiseudun ja Pirkanmaan liikennetutkimus 2012, Henkilöliikennetutkimus, Tampereen kaupunkiseutu, 2013, 55 s.
- [24] H. Kalenoja, H. Tiikkaja, M. Pajarre, P. Metsäpuro, M. Keränen, Tampereen seudun liikennemalli TALLI 2015- liikennemallin päivitys - Raporttiluonnos 28.12.2016, 2016, 51 s.
- [25] H. Kalenoja, K. Vihanti, V. Voltti, A. Korhonen, N. Karasmaa, Liikennetarpeen arviointi maankäytön suunnittelussa, *Suomen ympäristö 27/2008*, 2008, 75 s.

- [26] N. Karasmaa, 6.2 Liikenne-ennusteet, RIL 165-1 Liikenne ja väylät I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsinki, 2005, s. 234–267.
- [27] E. Kauppinen, Raitiotien pysäkkien nousijaennusteet 2025, Tampereen raitiotien aikataulu- ja kapasiteettitarkastelut, 2018, julkaisematon selvitys.
- [28] M. Keränen, E. Pohjalainen, E. Karvonen, S. Sarjamo, S. Lodenius, P. Söderström, Raitiotien tulevaisuuden suunnat Tampereen kaupunkiseudulla, 2018, 46 s.
- [29] M. Kuby, A. Barranda, C. Upchurch, Factors influencing light-rail station boardings in the United States, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, pp. 223–247.
- [30] K. Kumanto-Kooni, Raitiotiehankkeiden ennusteiden arviointi, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013, 125 s.
- [31] Laki liikenteen palveluista, L 320/2017, 2017, saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2017/20170320>.
- [32] A. Lehto, Joukkoliikenteen palvelutasomäärittelyä koskevan ohjeistuksen arviointi ja kehittäminen, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 31/2012, 2012, 80 s.
- [33] Liikennevirasto, Joukkoliikenteen palvelutason määrittely, Liikenneviraston ohjeita 31/2015, 2015, 43 s.
- [34] C. Liu, S. Erdogan, T. Ma, F.W. Ducca, How to Increase Rail Ridership in Maryland? Direct Ridership Models (DRM) for Policy Guidance, Journal of Urban Planning and Development, 2013, 15 p.
- [35] Y. Liu, J. Bunker, L. Ferreira, Modelling Urban Public Transit Users' Route Choice Behaviour: Review and Outlook, Rethinking Sustainable Development: Planning, Infrastructure, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure, 2009, 13 p.
- [36] X. Ma, J. Zhang, C. Ding, Y. Wang, A geographically and temporally weighted regression model to explore the spatiotemporal influence of built environment on transit ridership, Computers, Environment and Urban Systems, 2018, pp. 113–124.
- [37] Using GIS tools to estimate CO2 emissions related to the accessibility of large retail stores in the Oulu region, Finland, Journal of Transport Geography, 2011, pp. 346–354.

- [38] J. Madetoja, Error propagation in geographically weighted regression; Virheen kasautuminen maantieteellisesti painotetussa regressiossa, Aalto University; Aalto-yliopisto, 2018, 181 s.
- [39] J. McDaniel, projektipäällikkö, Ramboll Sverige, Sähköpostihaastattelu 4.9.2018.
- [40] I. Mellin, Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi, TKK, 2006, s. 231–433.
- [41] T. Nakaya, M. Charlton, P. Lewis, C. Brundson, J. Yao, S. Fotheringham, GWR4 User Manual, 2014.
- [42] H. Pesonen, P. Moilanen, J. Tervonen, H. Weiste, Joukkoliikenteen palvelutasotekijöiden arvottaminen, Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki, 2006, 74 s.
- [43] Pirkanmaan liitto, Pirkanmaan maankäyttövaihtoehdot ja vaikutusten arviointi, Maakuntakaavan perusratkaisut, 2014, 66 s.
- [44] T. Potter, vanhempi liikennesuunnittelija, Norconsult AS, haastattelu 8.6.2018.
- [45] PTV, Visum 15 manual, 2015.
- [46] K. Ruohonen, Tilastollinen kokeiden suunnittelu ja otanta, TTKK, opintomoni-
niste, 2000, 92 s.
- [47] M. Sandberg, liikennesuunnittelija, Norrköpingin kaupunki, Sähköpostihaastattelu 6.9.2018.
- [48] M. Scherer, K. Dziekan, Bus or Rail: An Approach to Explain the Psychological Rail Factor, Journal of Public Transportation, 2012, pp. 75–93.
- [49] K. Seimelä, liikenneinsinööri, Tampereen kaupunki, Sähköpostihaastattelu 16.8.2018.
- [50] O. Sørensen, suunnittelupäällikkö, Midttrafik, Århus, Sähköpostihaastattelu 22.10.2018.
- [51] Suomen ympäristökeskus, Yhdyskuntarakenteen seurannan aineistot, verkko-sivu, Saatavissa (viitattu 21.9.2018): http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ja_kaavoitus/Yhdyskuntarakenne/Tietoa_yhdyskuntarakenteesta/Yhdyskuntarakenteen_seurannan_aineistot.
- [52] Tampereen kaupunki, Tampereen raitiotien vaikutusten arviointi, yhteenvetoreportti, 2016, 77 s.

- [53] Tampereen kaupunki, Tampereen raitiotie, yleissuunnitelma, 2014, 96 s.
- [54] Tampereen raitiotie Oy Vaunun suunnittelu, verkkosivu, Saatavissa (viitattu: 9.8.2018): <https://tampereenratikka.fi/vaunun-suunnittelu/>.
- [55] Tampereen seudun joukkoliikenne, Linjasto2021, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 24.10.2018): <http://joukkoliikenne.tampere.fi/ohjeita-ja-tietoa/linjasto2021.html>.
- [56] T. Tørset, Kompletterende beregninger for analyse av Bybane i Bergen, 2002, 162 p.
- [57] C. Upchurch, M. Kuby, Evaluating light rail sketch planning: actual versus predicted station boardings in Phoenix, Transportation, 2014, pp. 173–192.
- [58] M. Vatanen, T. Elolähde, Helsingin Seudun Liikenne, ryhmähaastattelu 5.7. 2018.
- [59] J. West, liikenneanalyttikko, Helsingin Seudun Liikenne, haastattelu 11.7.2018.
- [60] L.G. Willumsen, Modelling Transport, Wiley, Hoboken, 2011, 586 p.

LIITE A: REGRESSIOMALLIEN MUUTTUJAVAIHTOEHDOT

| | |
|--------------------|--|
| NOUSIJAT | Selitettävä muuttuja, nousijoiden määrä pysäkillä arkivuorokaudessa |
| TYÖPAIKAT4 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat työpaikat |
| ASUKKAAT40 | 400 metrin säteellä pysäkistä asuvat asukkaat |
| TYÖPAIKAT6 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat työpaikat |
| ASUKKAAT60 | 600 metrin säteellä pysäkistä asuvat asukkaat |
| AUTO_1 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat asuinkunnat, joilla 1 auto |
| AUTO_2 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat asuinkunnat, joilla 2 autoa tai enemmän |
| AUTO_12 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat asuinkunnat, joilla 1 auto |
| AUTO_22 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat asuinkunnat, joilla 2 autoa tai enemmän |
| KAUPAT400 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien kauppojen lukumäärä |
| SUPERIT400 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien supermarkettien lukumäärä |
| VALINTA400 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien valintamyymälöiden lukumäärä |
| TAVARA400 | 400 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien tavaratalojen lukumäärä |
| KAUPAT600 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien kauppojen lukumäärä |
| SUPERIT600 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien supermarkettien lukumäärä |
| VALINTA600 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien valintamyymälöiden lukumäärä |
| TAVARA600 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevien tavaratalojen lukumäärä |
| ETÄISYYS | Etäisyys pysäkiltä Keskustorille linnuntietä |
| KESKUSTORI | Binäärimuuttuja, joka saa arvon 1, jos pysäkki sijaitsee keskustorilla |
| KOSKIPUISTO | Binäärimuuttuja, joka saa arvon 1, jos pysäkki sijaitsee keskustorilla |
| K6_TOD | 600 metrin todellisen kävelyetäisyyden sisällä sijaitsevat kaupat |
| KOULUT600 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat peruskoulut |
| TOAS600 | 600 metrin säteellä pysäkistä sijaitsevat Tampereen opiskelija-asuntosäätiön kohteet |
| AUTO_ALAK | Matka-aika autolla lähimpään alakeskukseen |
| AUTO_KESKU | Matka-aika autolla keskustaan |

| | |
|--------------------|--|
| JL_ALAKES | Matka-aika joukkoliikenteellä lähimpään alakeskukseen |
| JL_KESKUST | Matka-aika joukkoliikenteellä keskustaan |
| AIKA_TTY | Matka-aika Tampereen teknilliselle yliopistolle joukkoliikenteellä |
| AIKA_UTA | Matka-aika Tampereen yliopiston Kalevantien kampukselle joukkoliikenteellä |
| AIKA_TAMK | Matka-aika Tampereen ammattikorkeakoulun Kuntokadun kampukselle joukkoliikenteellä |
| DIST_KORKEA | Etäisyys lähimpään korkeakouluun katuverkkoa pitkin |
| AUTO_JKL | AUTO_KESKU / JL_KESKUST |
| KOULU_DUMM | Binäärimuuttuja, joka saa arvon 1, jos KOU-LUT600 != 0 |
| AS6_TOD | 600 metrin todellisen kävelyetäisyyden päässä asuvien asukkaiden lukumäärä |

LIITE B: RAITIOTIEN NOUSIJAT PYSÄKEITTÄIN LINJASTO2021-VAIHTOEHDOISSA

Taulukko: Linjasto2021 vaihtoehtojen raitiotien nousijamäärät pysäkeittäin

| Pysäkki | VE1 | VE2 | Erotus |
|-----------------|----------|----------|----------|
| Etelä-Hervanta | 418.3472 | 225.4 | 192.9472 |
| Hakametsä | 661.9591 | 501.0153 | 160.9438 |
| Hallila | 125.5042 | 231.4051 | -105.901 |
| Hervantajärvi | 62.83339 | 402.6453 | -339.812 |
| Hervantakeskus | 603.6231 | 126.9352 | 476.6879 |
| Hippos | 217.7969 | 126.7283 | 91.06859 |
| Kaleva | -154.533 | 1248.703 | -1403.24 |
| Kalevan kirkko | 6.032294 | 1641.089 | -1635.06 |
| Kalevanrinne | 202.7653 | 377.9879 | -175.223 |
| Kanjoni | 65.55854 | 994.0271 | -928.469 |
| Keskustori | 1223.923 | 708.6759 | 515.2469 |
| Koskipuisto | 1537.821 | 854.5012 | 683.32 |
| Mikontalo | 460.4644 | 901.3948 | -440.93 |
| Opiskelijankatu | 252.8083 | 212.1639 | 40.64446 |
| Pyynikintori | 702.5704 | 315.2905 | 387.2798 |
| Rautatieasema | 299.9188 | 12.94632 | 286.9725 |
| Sampola | 438.5233 | 120.7334 | 317.7899 |
| Tammela | 395.5735 | 240.5782 | 154.9952 |
| TAYS | 459.447 | 351.6371 | 107.8099 |
| Turtola | 528.4146 | 560.6395 | -32.2249 |
| Tuulensuu | 565.7752 | 499.0373 | 66.73788 |
| Uintikeskus | 467.587 | 478.4768 | -10.8897 |
| Vieritie | 374.4499 | 563.3494 | -188.9 |
| Yhteensä | 9917.16 | 11695.36 | -1778.2 |

LIITE C: ESIMERKKI PYSÄKKIKOHTAISISTA TULOISTA GWR-MALLILLA

| stop_id | stop_name | VA- LINTA400 | JL_ALAKES | INTER- CEPT | TYÖPAIKAT 400 | KESKUS TORI | KOSKIP UISTO | AS6_TOD | AIKA_UTA | NOUSIJAT |
|---------|------------------------|-----------------|-----------|----------------|------------------|----------------|-----------------|----------|----------|----------|
| 0010 | Keskustori F | 204 | -509 | 527 | 323 | 498 | 0 | 168 | -53 | 1159 |
| 0011 | Keskustori G | 104 | -515 | 538 | 337 | 498 | 0 | 164 | -52 | 1073 |
| 0012 | Keskustori H | 35.96563 | -517.182 | 546.7585 | 343.9043 | 498.2015 | 0 | 157.209 | -50.4758 | 1014.382 |
| 0024 | Metso | 299.084 | -281.932 | 329.4234 | 175.2734 | 0 | 0 | 263.8202 | -63.381 | 722.288 |
| 0025 | Aleksanterin kirkko | 305.2446 | -227.437 | 278.629 | 123.8334 | 0 | 0 | 257.0044 | -62.0318 | 675.2426 |
| 0028 | Pyynikintori B | 123.4211 | -127.473 | 178.4131 | 39.07564 | 0 | 0 | 190.0783 | -48.3793 | 355.1362 |
| 0029 | Pyynikintori | 104.53 | -126.134 | 174.9717 | 37.21706 | 0 | 0 | 187.4158 | -46.5849 | 331.4159 |
| 0031 | Pyynikintori | 93.13445 | -128.237 | 173.4868 | 37.02782 | 0 | 0 | 170.945 | -45.7867 | 300.5707 |
| 0035 | Keskustori C | 55.48566 | -510.03 | 539.241 | 347.2714 | 498.2015 | 0 | 155.8779 | -51.2809 | 1034.767 |